

# ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL TORNEADO DE INCONEL 718 CON HERRAMIENTAS PCBN EN CONDICIONES DE ACABADO A ALTA VELOCIDAD DE CORTE

Víctor Criado del Álamo

Tesis depositada en cumplimiento parcial de los requisitos para el  
grado de Doctor en

Doctorado en Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial

Universidad Carlos III de Madrid

Directores:

José Díaz Álvarez  
José Luis Cantero Guisández

Tutor:

José Díaz Álvarez

Diciembre, 2020

Esta tesis se distribuye bajo licencia “Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



*A mis padres, hermano e Irene*



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis dos directores de la tesis que me han ayudado durante estos años: José Díaz Álvarez y José Luis Cantero Guisández. A José Díaz por darme la oportunidad de participar en diferentes investigaciones ayudándome y guiándome desde el día que entré a trabajar. Gracias por toda la dedicación y motivación que me has mostrado estos años que me ha ayudado a seguir adelante. A José Luis Cantero por todo el tiempo dedicado y ayuda en las investigaciones desarrolladas. Tu conocimiento y pasión son un ejemplo a seguir. También agradecer a Henar Miguélez por transmitir su energía y forma de trabajar que te hace interesarte por el mundo de la investigación.

También a mis compañeros y amigos del departamento de Ingeniería Aeroespacial, por su ayuda y compañía que durante los primeros años ha sido fundamental. En especial agradecer a mis compañeros del H03 que han conseguido que los años volaran y de dónde han salido grandes amistades que durarán muchos años.

A mis compañeros del departamento de Ingeniería Mecánica, gracias por todos los momentos compartidos y risas durante estos años que han hecho más llevadero este camino.

A mis padres que siempre han confiado en mí y me ha apoyado. A mi padre por todo el amor demostrado por la familia que siempre ha sido un ejemplo para mí. A mi madre, su inteligencia, amor y pasión siempre estarán presente en mí. Siempre estaré agradecido por todo el esfuerzo y apoyo que habéis puesto por mí.

A mi hermano Álvaro ya que hemos compartido grandes momentos, y como hermano mayor siempre fuiste un ejemplo en todo. Siguiendo tus pasos pude estudiar lo que se ha convertido en mi vocación ingenieril.

A toda mi familia que ha estado siempre apoyándome y arropándome. Mis tíos y mis primos que siempre han estado conmigo en todas nuestras reuniones familiares y primadas.

Por último, quiero agradecer a Irene ya que has sido parte fundamental en mi vida apoyándome y queriéndome para sacar lo mejor de mí. Eres la mejor compañera de viaje que he podido tener durante estos años.

En definitiva, quiero agradecer a todo el mundo que ha formado parte de mi vida estos años. Gracias por ayudarme y apoyarme siempre para conseguir mis objetivos.

## CONTENIDOS PUBLICADOS Y PRESENTADOS

A continuación, se presentan los artículos o contribuciones publicadas en las que soy autor o coautor:

- V. Criado, J. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, and M. H. Miguélez, “Study of the performance of PCBN and carbide tools in finishing machining of Inconel 718 with cutting fluid at conventional pressures,” *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 634–637, Jan. 2018. DOI: 10.1016/J.PROCIR.2018.08.189; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118310382?via%3Dihub>
- J. Cantero, J. Díaz-Álvarez, D. Infante-García, M. Rodríguez, and V. Criado, “High Speed Finish Turning of Inconel 718 Using PCBN Tools under Dry Conditions,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 3, p. 192, Mar. 2018. DOI: 10.3390/met8030192; <http://www.mdpi.com/2075-4701/8/3/192>
- J. Díaz-Álvarez, V. Criado, H. Miguélez, and J. Cantero, “PCBN Performance in High Speed Finishing Turning of Inconel 718,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 8, p. 582, Jul. 2018. DOI: 10.3390/met8080582; <http://www.mdpi.com/2075-4701/8/8/582>

Además, las siguientes presentaciones se han realizado para dar visibilidad al trabajo de investigación durante el periodo de la tesis:

- V. Criado, J. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, and M. H. Miguélez, “Study of the performance of PCBN and carbide tools in finishing machining of Inconel 718 with cutting fluid at conventional pressures”. En “8th CIRP Conference on High Performance Cutting”; Budapest, Hungría, 2018.
- V. Criado, J. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, and M. H. Miguélez, “Mecanizado de acabado con fluido de corte de superaleaciones de base níquel empleando herramientas PCBN”. En la 21 edición del Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnología de Fabricación; San Sebastián, España, 2017.

## OTROS MÉRITOS DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se presentan los artículos o contribuciones publicadas no incluido en la tesis en las que soy autor o coautor:

- V. Criado, N. Feito, J. L. Cantero Guisández, and J. Díaz-Álvarez, “A New Cutting Device Design to Study the Orthogonal Cutting of CFRP Laminates at Different Cutting Speeds,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 24, p. 4074, Dec. 2019

Además, la siguiente presentación se han realizado para dar visibilidad al trabajo anterior:

- V. Criado, J. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, and M. H. Miguélez, “Experimental study of orthogonal cutting of CFRP”. En “5th International Conference on Mechanics Composites”; Lisboa, Portugal, 2019.

## Resumen

Los procesos de conformado por arranque de viruta tienen una gran relevancia en la industria de fabricación y siguen presentando grandes desafíos científicos y tecnológicos debido a la gran complejidad de las condiciones termomecánicas producidas en la zona de corte.

Esta tesis se centra en el mecanizado de acabado de Inconel 718. Se trata de una superaleación de base níquel ampliamente usada en la actualidad en distintos campos como el de automoción, aeroespacial, naval etc. Esta aleación se caracteriza por ser un material de muy baja maquinabilidad debido a sus excelentes propiedades mecánicas a elevadas temperaturas, su elevado endurecimiento por deformación y su baja conductividad térmica, que hace que se generen grandes temperaturas y presiones en la interfase entre pieza y herramienta.

Actualmente, las operaciones de acabado de Inconel 718 se realizan empleando herramientas de metal duro con abundante refrigeración. Estas herramientas presentan una elevada tenacidad que permite emplear geometrías de filo agudas y positivas que garantizan un buen control del daño debido a mecanizado. En esta tesis se ha analizado la posibilidad de emplear nuevas herramientas PCBN (*Polycrystalline cubic boron nitride*) con bajo contenido en CBN, que combinan una elevada dureza a alta temperatura con una tenacidad mayor que la de las herramientas PCBN convencionales. La aplicación de herramientas PCBN permitiría emplear velocidades de corte muy superiores a las de los procesos industriales actuales con herramientas de metal duro.

Se han realizado ensayos de mecanizado con cuatro herramientas PCBN comerciales con distintas características en cuanto a preparación de filo, recubrimiento y contenido de CBN. Asimismo, se hicieron ensayos con herramientas de metal duro para poder realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con las nuevas herramientas PCBN en relación con los resultados propios de las condiciones de mecanizado empleadas actualmente a nivel industrial. Para confirmar la viabilidad de estos procesos y determinar las condiciones óptimas de mecanizado se consideraron distintas combinaciones de parámetros de corte, así como tres condiciones de refrigeración: seco, aceite soluble a presión convencional y aceite soluble a alta presión.

Para todas las condiciones de mecanizado y herramientas indicadas se determinó y analizó la evolución del desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial, la tasa de eliminación de material y las componentes de la fuerza de mecanizado.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de estos procesos mediante el análisis de los parámetros térmicos y mecánicos en la zona de corte se desarrolló y validó experimentalmente un modelo numérico basado en elementos finitos para estudiar el



efecto en el mecanizado de las dos preparaciones de filo que dieron mejores resultados en los ensayos de desgaste.

Las principales conclusiones extraídas a partir de los resultados obtenidos fueron las siguientes:

- Las herramientas PCBN no son aplicables al acabado en seco de Inconel 718 debido a la inestabilidad del corte en estas condiciones que provoca su rápido desgaste por roturas frágiles.
- Por el contrario, se ha demostrado la viabilidad de emplear herramientas PCBN en condiciones de mecanizado con fluido de corte a presión convencional y alta presión. Aunque la duración de estas herramientas es notablemente inferior a la de las herramientas de carburo, las elevadas velocidades de corte que permiten las herramientas PCBN permiten alcanzar mayores superficies mecanizadas por filo y por unidad de tiempo.
- Las herramientas PCBN tienen un mejor comportamiento que las herramientas de metal duro en cuanto al acabado superficial obtenido. No se observan diferencias significativas entre los resultados de acabado superficial en los procesos con refrigeración a presión convencional y a alta presión.
- En las operaciones de acabado con herramienta PCBN, emplear refrigeración a alta presión incrementó significativamente la vida de las herramientas.
- La preparación del filo tiene una influencia relevante en el comportamiento de las herramientas PCBN en acabado de Inconel 718. Afilados menos agudos provocaron mayores fuerzas de mecanizado y una menor duración de la herramienta. En los ensayos realizados, los mejores resultados se obtuvieron para una herramienta con un afilado de tipo elíptico que combina una geometría robusta con fuerzas de mecanizado reducidas propias de afilados agudos.
- Los resultados numéricos con herramientas con distintas preparaciones de filo muestran que el incremento de fuerzas de mecanizado para las herramientas con afilados menos agudos se debe principalmente a que aumenta la altura del punto de estancamiento y por tanto la cantidad de material que fluye bajo el filo y provoca un mayor empuje por recuperación elástica (*ploughing force*). Este fenómeno explica el menor desgaste de flanco observado experimentalmente para las herramientas con afilados más agudos. Asimismo, en las simulaciones numéricas con la herramienta con mayor radio de filo aparente se obtuvieron mayores temperaturas en la superficie mecanizada y mayores deformaciones en el material.
- En los modelos numéricos se obtuvieron mayores temperaturas en la herramienta al incrementar el espesor de viruta no deformada. Este resultado es coherente con la aparición de mayores desgastes de cráter en los ensayos realizados con mayor avance y profundidad de pasada.

# Abstract

Machining processes are very relevant in the manufacturing industry and still present high scientific and technological challenges due to the great complexity of the thermomechanical conditions produced in the cutting zone.

This thesis is focused on the finishing machining of Inconel 718. This is a nickel-based superalloy widely used today in different fields such as automotive, aerospace, naval, etc. This alloy is characterized by a very low machinability due to the excellent mechanical properties at high temperatures, high strain hardening and low thermal conductivity, which causes high temperatures and pressures at the interface between part and tool.

Currently, finishing operations of Inconel 718 are performed using carbide tools with abundant coolant. These tools have a high level of toughness that allows the use of sharpened and positive cutting edge geometries that ensure proper damage control during machining. In this thesis, the possibility of using new PCBN (Polycrystalline cubic boron nitride) tools with a low CBN content has been analyzed. These tools combine high hardness at high temperature with higher toughness than conventional PCBN tools. The application of PCBN tools would allow the use of cutting speeds much higher than those of current industrial processes with carbide tools.

Machining tests have been carried out with four commercial PCBN tools with different characteristics in relation to cutting edge preparation, coating and CBN content. Also, tests were carried out with hard metal tools in order to provide a comparative analysis of the results obtained with the new PCBN tools in relation to the results of the machining conditions currently used at industrial level. To confirm the viability of these processes and to determine the optimum machining conditions, different combinations of cutting parameters were considered, as well as three cooling conditions: dry, conventional pressure soluble oil and high pressure soluble oil.

For all machining conditions and tools indicated, the evolution of tool wear, surface roughness, material removal rate and machining force components were determined and analyzed.

In order to increase our knowledge of these processes by analyzing the thermal and mechanical parameters in the cutting area, a numerical model based on finite elements was developed and experimentally validated to study the effect on machining of the two edge preparations that gave the best results in the wear tests.

The main conclusions reached from the results obtained were the following:

- PCBN tools are not applicable to finishing Inconel 718 under dry conditions due to the instability of the cut under these conditions which causes rapid wear from fragile breaks.

- On the contrary, the viability of using PCBN tools in machining conditions with conventional pressure cutting fluid and high pressure has been demonstrated. Although the duration of these tools are significantly lower than that of carbide tools, the high cutting speeds that PCBN tools allow to reach higher machined surfaces by edge and by unit of time.
- PCBN tools have a better behavior than carbide tools in terms of the surface finish obtained. There are no significant differences between the surface finish results in the processes with conventional and high pressure cooling.
- In the finishing operations with PCBN tools, the use of high pressure cooling increased significantly the life of the tools.
- Cutting edge preparation has a significant influence on the behavior of PCBN tools for finishing Inconel 718. Less sharp edges ended in higher machining forces and shorter tool life. In the tests conducted, the best results were obtained for a tool with an elliptical cutting edge that combines robust geometry with reduced machining forces typical of sharp cutting edges.
- The numerical results with different cutting edge preparations show that the increase in machining forces for tools with less sharp cutting edges is mainly due to the higher height of the stagnation point and therefore the amount of material that flows under the edge and causes a higher ploughing force. This phenomenon explains the lower flank wear observed experimentally for tools with sharper cutting edges. Also, in numerical simulations with the tool with the biggest apparent cutting edge radius, a higher temperature on the machined surface and a higher deformation of the material were obtained.
- In the numerical models, higher tool temperatures were obtained when increasing the undeformed chip thickness. This result is consistent with the appearance of higher crater wear in the tests carried out with higher feed rates and depth of pass.

# Índice

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivación y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Introducción al mecanizado</b>	<b>3</b>
1.2.1. Fuerzas de mecanizado	5
1.2.2. Temperatura en los procesos de mecanizado	6
1.2.3. Operaciones de acabado	7
1.2.4. Rugosidad	9
1.2.5. Refrigerante	11
1.2.5.1. Fluido de corte a alta presión	13
1.2.5.2. MQL (Minimum Quantity Lubrication)	14
1.2.5.3. Refrigeración Criogénica	14
1.2.6. Herramientas de corte	14
1.2.7. Geometría de la herramienta	18
1.2.8. Preparación del filo de corte	19
1.2.9. Desgaste	21
<b>1.3. Mecanizado de superaleaciones</b>	<b>23</b>
1.3.1. Aleaciones de titanio	24
1.3.2. Superaleación de base cobalto	25
1.3.3. Superaleación de base hierro	25
1.3.4. Superaleación de base níquel	25
1.3.5. Inconel 718	27
<b>1.4. Estructura de la tesis</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 2: TRABAJO EXPERIMENTAL</b>	<b>31</b>
<b>2.1. Introducción</b>	<b>31</b>
<b>2.2. Estado del arte en la investigación experimental de mecanizado de las superaleaciones con base níquel</b>	<b>32</b>
2.2.1. Mecanizado de superaleaciones de base níquel con herramientas de carburo	36
2.2.2. Aplicación de herramientas PCBN al mecanizado de aceros endurecidos y de superaleaciones de base níquel	37
2.2.3. Efecto del fluido de corte en mecanizado de superaleaciones base níquel	39

<b>2.3. Descripción de los ensayos de mecanizado realizados</b>	<b>42</b>
2.3.1. Material y herramienta de corte	42
2.3.2. Metodología y equipos experimentales.	44
<b>2.4. Ensayos en seco</b>	<b>47</b>
2.4.1. Condiciones de corte	47
2.4.2. Resultados experimentales	49
2.4.2.1.Fuerza de corte	49
2.4.2.2.Desgaste	54
2.4.2.3.Vida de la herramienta	57
2.4.2.4.Rugosidad	59
<b>2.5. Ensayos con fluido de corte a presión convencional</b>	<b>61</b>
2.5.1. Condiciones de corte	61
2.5.2. Resultados	62
2.5.2.1.Fuerza de corte	62
2.5.2.2.Desgaste	70
2.5.2.3.Vida de la herramienta	75
2.5.2.4.Rugosidad	78
<b>2.6. Ensayos con fluido de corte a alta presión</b>	<b>82</b>
2.6.1. Condiciones de corte	82
2.6.2. Resultados	82
2.6.2.1.Fuerza de corte	82
2.6.2.2.Desgaste	85
2.6.2.3.Vida de la herramienta	87
2.6.2.4.Rugosidad	88
<b>2.7. Conclusiones</b>	<b>90</b>
 <b>CAPÍTULO 3: MODELADO NUMÉRICO</b>	 <b>93</b>
<b>3.1. Introducción</b>	<b>93</b>
<b>3.2. Conceptos básicos del modelo de elementos finitos</b>	<b>94</b>
<b>3.3. Estado del arte en modelos numéricos de mecanizado</b>	<b>96</b>
<b>3.4. Descripción del modelo numérico</b>	<b>100</b>
3.4.1. Código de elementos finitos	100
3.4.2. Geometría	101
3.4.2.1.Herramienta de corte	101
3.4.2.2.Pieza de trabajo	102
3.4.3. Materiales	103
3.4.3.1.Inconel 718	105
3.4.3.2.PCBN	108

3.4.4.	Condiciones de contorno mecánicas	108
3.4.5.	Condiciones de contorno térmicas	109
3.4.6.	Interacciones de contacto	109
3.4.7.	Mallado	110
3.4.8.	Análisis de la sensibilidad de la malla	112
<b>3.5.</b>	<b>Validación del modelo</b>	<b>114</b>
<b>3.6.</b>	<b>Resultados</b>	<b>118</b>
3.6.1.	Fuerzas de corte	118
3.6.2.	Longitud de contacto	119
3.6.3.	Temperatura en la pieza de trabajo	120
3.6.3.1.	Temperatura en la superficie mecanizada	120
3.6.3.2.	Temperatura en la viruta	121
3.6.4.	Temperatura en la herramienta de corte	122
3.6.5.	Zona de estancamiento	125
3.6.6.	Morfología de viruta	128
<b>3.7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>130</b>
<b>CAPÍTULO 4:</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>133</b>
<b>4.1.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>133</b>
<b>4.2.</b>	<b>Trabajos futuros</b>	<b>137</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>139</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> a) Mandrinadora de John Wilkinson, b) Fresadora CNC 5 ejes de HAAS (UMC-500SS).....	4
<b>Figura 2.</b> Fuerzas de mecanizado. ....	6
<b>Figura 3.</b> Principales zonas térmicas producidas en el mecanizado.....	7
<b>Figura 4.</b> Rugosidad media aritmética. ....	10
<b>Figura 5.</b> Comparación de la rotura de viruta para fluido de corte a presión convencional y a alta presión [4] .....	13
<b>Figura 6.</b> Dureza típica de los materiales de herramientas frente a la temperatura [6]. Figura reproducida con permiso del propietario de los derechos de autor, E.O Ezugwu.....	16
<b>Figura 7.</b> Partes de la herramienta de corte .....	18
<b>Figura 8.</b> Ángulos de herramienta de corte .....	18
<b>Figura 9.</b> Geometría de las preparaciones de filo de las herramientas de corte. ....	20
<b>Figura 10.</b> Tipos de desgaste de las herramientas de corte [15] .....	23
<b>Figura 11.</b> Porcentaje del consumo de las superaleaciones [6].....	24
<b>Figura 12.</b> Propiedades en función de la temperatura del Inconel 718 [18].....	27
<b>Figura 13.</b> Torno Pinacho Smart 6/165 y sistema de alta presión Smart Cooling System. ....	44
<b>Figura 14.</b> Disposición experimental de la instrumentación usada para los ensayos de mecanizado. ....	45
<b>Figura 15.</b> a) Incremento de la sección de viruta no deformada en la parte final de una pasada de cilindrado. b) Evolución de las fuerzas de mecanizado durante una pasada de cilindrado realizada sin emplear herramienta secundaria (se observa el incremento de fuerzas final).....	46
<b>Figura 16.</b> Dinamómetro Kistler 9257B.....	46
<b>Figura 17.</b> Componentes y resultante de la fuerza específica de mecanizado en los ensayos de torneado con las herramientas de carburo sin desgaste (herramientas nuevas). ....	49
<b>Figura 18.</b> Componentes y resultante de la fuerza de corte específica en los ensayos de torneado con las herramientas de PCBN de Seco sin desgaste (herramientas nuevas).....	51
<b>Figura 19.</b> Componentes y resultante de la fuerza de corte específica en los ensayos de torneado con las herramientas de PCBN sin desgaste (herramientas nuevas).....	52
<b>Figura 20.</b> Evolución de las componentes de las fuerzas específicas para la herramienta de metal duro (TS2000, Seco). Profundidad de corte para las figuras a), b) y c) 0,5 mm y para las figuras d) y e) 0,25 mm. ....	53
<b>Figura 21.</b> Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado para la herramienta PCBN (Seco). Velocidad de corte para las figuras a), b) y c) 200 m/min y para las figuras d) y e) 300 m/min. ....	54
<b>Figura 22.</b> Imágenes de las herramientas de carburo TS2000 de Seco con el microscopio SEM que se corresponden con el final de vida. Velocidad de corte 50 m/min, avance	

0,1 mm y profundidad de 0,25 mm. a) Superficie de desprendimiento, b) superficie de incidencia.....	55
<b>Figura 23.</b> Imágenes de las herramientas de PCBN de Seco con el microscopio SEM que se corresponden con el final de vida. Velocidad de corte 300 m/min, avance 0,15 mm y profundidad de corte a) 0,25 mm y b) 0,15 mm.....	56
<b>Figura 24.</b> Formación de la viruta secundaria en ensayos de mecanizado con herramienta PCBN MB8025 de Mitsubishi. Velocidad (imágenes obtenidas mediante cámara de alta velocidad). Velocidad de corte 300 m/min, avance 0,15mm y profundidad de corte 0,15 mm. ....	56
<b>Figura 25.</b> Rugosidad media medida al inicio del ensayo de mecanizado ( $Ra_{ini}$ ) y al final de la vida de la herramienta ( $Ra_{end}$ ) con la herramienta de carburo TS2000. ....	60
<b>Figura 26.</b> Rugosidad media medida al inicio del ensayo de mecanizado ( $Ra_{ini}$ ) y al final de la vida de la herramienta ( $Ra_{end}$ ) con diferentes herramientas de PCBN.....	61
<b>Figura 27.</b> Componentes y resultante de la fuerza específica de mecanizado en los ensayos de torneado con fluido de corte a presión convencional con las herramientas de carburo sin desgaste (herramientas nuevas).....	63
<b>Figura 28.</b> Evolución de las componentes de la fuerza de específica de mecanizado para la herramienta de carburo (TS2000).....	63
<b>Figura 29.</b> Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN. Profundidad de 0,15 mm. ....	64
<b>Figura 30.</b> Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN de Seco (CBN170). ....	65
<b>Figura 31.</b> Evolución de las fuerzas específicas de mecanizado [kN/mm <sup>2</sup> ] para las herramientas de PCBN. ....	67
<b>Figura 32.</b> Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado [kN/mm <sup>2</sup> ] para la herramienta de SECO (CBN170) en condiciones de fluido de corte a presión convencional (7,5 bar).....	69
<b>Figura 33.</b> Imágenes del desgaste a final de vida de las herramientas TS2000 (Microscopio óptico): superficie de incidencia (imagen superior) y superficie de desprendimiento (imagen inferior).....	70
<b>Figura 34.</b> Imágenes del desgaste a final de vida de las herramientas TS2000 (Microscopio SEM). a) $V_c=50\text{m/min}$ , $a=0.1\text{mm/rev}$ b) $V_c=70\text{m/min}$ , $a=0.15\text{mm/rev}$ .....	71
<b>Figura 35.</b> Imágenes del desgaste de las herramientas PCBN al final de vida (Microscopio SEM). a) Herramienta MB8025, $V_c=250\text{ m/min}$ , $a=0,1\text{ mm/rev}$ , $p=0,15\text{ mm}$ . b) Herramienta 7015, $V_c=300\text{ m/min}$ , $a=0,1\text{ mm/rev}$ , $p=0,15\text{ mm}$ .....	72
<b>Figura 36.</b> Imágenes del desgaste de la herramienta PCBN de Sandvik (7015) al final de vida (microscopio óptico): superficie de incidencia (imagen superior) y superficie de desprendimiento (imagen inferior).....	72
<b>Figura 37.</b> Imágenes del desgaste de la herramienta PCBN de Sandvik (7015) al final de vida (Microscopio SEM). Arriba superficie de incidencia, abajo superficie de desprendimiento.....	73
<b>Figura 38.</b> Desgaste de la herramienta PCBN de Seco con microscopio óptico ( $V_c=200\text{ m/min}$ , $a=0,15\text{ mm/rev}$ y $p=0,25\text{ mm}$ ).....	74
<b>Figura 39.</b> Evolución del desgaste de flanco para las herramientas ensayadas.....	75
<b>Figura 40.</b> Rugosidad media aritmética inicial y final para las herramientas de carburo TS2000.....	79



<b>Figura 41.</b> Rugosidad media aritmética inicial y final para todas las herramientas PCBN ensayadas a profundidad de 0,15 mm. Avance (mm/rev) y velocidad de corte (m/min)....	79
<b>Figura 42.</b> Rugosidad media aritmética inicial y final para la herramienta PCBN de seco (CBN170) a presión convencional. Avance (mm/rev) y profundidad (mm) y velocidad de corte (m/min).....	80
<b>Figura 43.</b> Evolución de la rugosidad media aritmética [ $\mu\text{m}$ ] en herramientas de carburo TS2000.....	81
<b>Figura 44.</b> Evolución de la rugosidad media aritmética [ $\mu\text{m}$ ] en herramientas PCBN.....	81
<b>Figura 45.</b> Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN de Seco (CBN170) con fluido de corte a alta presión.....	83
<b>Figura 46.</b> Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado [ $\text{kN/mm}^2$ ] para las herramientas de Seco (CBN170) en condiciones de fluido de corte a alta presión (70 bar).....	84
<b>Figura 47.</b> Evolución del desgaste con taladrina a alta presión y condiciones de corte de velocidad de 250 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,25 mm. ....	86
<b>Figura 48.</b> Desgaste a final de vida con taladrina a alta presión y condiciones de corte de velocidad de corte de 200 y 300 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,15 mm. ....	86
<b>Figura 49.</b> Rugosidad media aritmética inicial y final para la herramienta PCBN de seco (CBN170) a alta presión. Avance (mm/rev) y profundidad (mm) y velocidad de corte (m/min).....	89
<b>Figura 50.</b> Comparativa de la evolución de la rugosidad media aritmética [ $\mu\text{m}$ ] en herramienta CBN170 a presión convencional y alta presión (HPC). a) Profundidad de 0,15 mm, b) profundidad de 0,25 mm.....	90
<b>Figura 51.</b> Geometría de la herramienta PCBN 2D con el detalle de la geometría de los filos de corte de la herramienta 7015 y CBN170.....	102
<b>Figura 52.</b> Geometría de la pieza de trabajo 2D.....	103
<b>Figura 53.</b> Curva de tensión deformación para diferentes temperaturas del Inconel 718 ( $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ ).....	106
<b>Figura 54.</b> Condiciones de contorno del modelo numérico. ....	109
<b>Figura 55.</b> Mallado de la herramienta de corte con sus respectivas ventanas de mallado.....	111
<b>Figura 56.</b> Mallado de la pieza de trabajo durante el mecanizado con sus respectivas ventanas de mallado.....	112
<b>Figura 57.</b> Análisis de la sensibilidad de la malla para la herramienta CBN170. a) $V_c=300 \text{ m/min}$ y $a=0,15 \text{ mm/rev}$ , y b) $V_c=300 \text{ m/min}$ y $a=0,05 \text{ mm/rev}$ .....	113
<b>Figura 58.</b> Disposición experimental de los ensayos de validación. ....	115
<b>Figura 59.</b> Componentes de las fuerzas de mecanizado experimentales para los ensayos de validación. a) fuerza de corte, b) fuerza de avance.....	116
<b>Figura 60.</b> Componentes de las fuerzas de mecanizado numéricas con la herramienta PCBN (CBN 170 SECO); a) fuerza de corte, b) fuerza de avance .....	117
<b>Figura 61.</b> Comparativa de las fuerzas de mecanizado numéricas y experimentales; a) fuerza de corte, b) fuerza de avance.....	117
<b>Figura 62.</b> Comparativa de las fuerzas de mecanizado de las herramientas 7015 y CBN170. a) Componente de la fuerza de corte, b) componente de la fuerza de avance. ....	118
<b>Figura 63.</b> Representación de la longitud de contacto proyectada.....	119

<b>Figura 64.</b> Longitud de contacto máxima proyectada para las herramientas CBN170 y 7015.....	120
<b>Figura 65.</b> Temperatura máxima alcanzada en la pieza de trabajo para las herramientas CBN170 y 7015.....	121
<b>Figura 66.</b> Distribución de la temperatura en la viruta con la herramienta CBN170 a velocidad de corte de 300 m/min para los avances: 0,05 mm/rev (imágenes superiores) y 0,15 mm/rev (imágenes inferiores).....	122
<b>Figura 67.</b> Evolución de la temperatura en la herramienta CBN170 para velocidad de corte de 200 m/min y avances de: 0,05 mm/rev (imágenes superiores) y 0,15 mm/rev (imágenes inferiores).....	123
<b>Figura 68.</b> Evolución de la temperatura máxima en la herramienta CBN170.....	124
<b>Figura 69.</b> Temperatura en la punta de la herramienta para velocidad de corte de 300 m/min y avance de 0,15 mm/rev. $t = 0,0014$ s.....	125
<b>Figura 70.</b> Representación de la zona de estancamiento.....	126
<b>Figura 71.</b> Altura del punto de estancamiento máximo para las herramientas CBN170 y 7015.....	127
<b>Figura 72.</b> Zona de estancamiento para las herramientas CBN170 y 7015. Velocidad de corte de 300 m/min y avance 0,15 mm/rev (imágenes superiores); Velocidad de corte de 200 m/min y avance 0,05 mm/rev (imágenes inferiores).....	127
<b>Figura 73.</b> Representación de los principales parámetros medibles en una viruta serrada.....	129

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Propiedades en función de la incorporación de elementos químicos a la superaleación de base níquel. ....	26
<b>Tabla 2.</b> Composición química típica del Inconel 718. ....	28
<b>Tabla 3.</b> Resumen de trabajos de investigación relevantes en procesos de mecanizado de Inconel 718 .....	35
<b>Tabla 4.</b> Composición química del Inconel 718.....	42
<b>Tabla 5.</b> Características de las herramientas de corte ensayadas.....	43
<b>Tabla 6.</b> Condiciones de corte establecida para los tres grupos de ensayos en condiciones de seco. ....	48
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la vida de la herramienta, superficie mecanizada en tiempo y superficie mecanizado por filo para los ensayos realizados.....	58
<b>Tabla 8.</b> Condiciones de corte para los ensayos realizado con herramientas de carburo y PCBN a presión convencional.....	62
<b>Tabla 9.</b> Vida, superficie mecanizada por unidad de tiempo y por filo en los ensayos con herramientas de carburo TS2000.....	76
<b>Tabla 10.</b> Vida, superficie mecanizada por unidad de tiempo y por filo de las diferentes herramientas PCBN para las condiciones de corte ensayadas.....	77
<b>Tabla 11.</b> Condiciones de corte para los ensayos realizado con la herramienta PCBN CBN170 con refrigeración a alta presión (70 bares).....	82
<b>Tabla 12.</b> Vida, superficie mecanizada en tiempo y por filo de la herramienta PCBN CBN 170 para las condiciones de corte ensayadas con taladrina a alta presión. ....	87
<b>Tabla 13.</b> Parámetros de la ecuación de Johnson-Cook correspondiente al Inconel 718. ....	106
<b>Tabla 14.</b> Módulo de elasticidad y coeficiente de poisson para diferentes valores de temperatura. ....	107
<b>Tabla 15.</b> Conductividad térmica (W/m/°C) y calor específico (J/kg/°C) en función de la temperatura para el Inconel 718. ....	107
<b>Tabla 16.</b> Coeficiente de expansión térmica frente en función de la temperatura para el Inconel 718. ....	108
<b>Tabla 17.</b> Propiedades de la herramienta PCBN modelizada.....	108
<b>Tabla 18.</b> Tamaño de elemento de las mallas seleccionadas para el análisis de la sensibilidad de la malla para avance de 0,15 mm/rev y 0,05 mm /rev.....	113
<b>Tabla 19.</b> Condiciones de corte para los ensayos de validación con la herramienta PCBN a presión de corte de 7,5 bar. ....	115
<b>Tabla 20.</b> Valores de las principales características de la morfología de la viruta al mecanizar con la herramienta CBN170.....	129
<b>Tabla 21.</b> Valores de las principales características de la morfología de la viruta al mecanizar con la herramienta 7015.....	130



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

---

#### 1.1. Motivación y objetivos

La industria aeronáutica es un sector en continua evolución y crecimiento siendo necesario el desarrollo de materiales avanzados que posean mayores prestaciones. Las superaleaciones de base níquel, y en concreto la aleación Inconel 718, se usan en turbinas de aeronaves por sus excelentes propiedades mecánicas, su elevada resistencia a altas temperaturas y la presencia de cromo que proporciona una elevada resistencia a oxidación y corrosión.

Estas propiedades, junto con su elevado endurecimiento por deformación, baja conductividad térmica y la presencia de carburos que provoca una elevada abrasión sobre la herramienta de corte hacen que las superaleaciones de base níquel se encuentren entre los materiales con menor maquinabilidad. Además, en la definición de los procesos finales de acabado debe considerarse que en las aplicaciones de estos materiales en sistemas de propulsión en el sector aeroespacial se imponen altas exigencias en cuanto a calidad superficial y control de integridad. Esto hace que el mecanizado de esta aleación haya sido ampliamente estudiado por numerosos investigadores. Para garantizar el adecuado control del daño debido al mecanizado, en las operaciones de acabado es necesario emplear herramientas con afilados agudos y geometrías positivas, que convencionalmente llevan a la necesidad de emplear herramientas de corte de metal duro. La baja maquinabilidad de las superaleaciones

## 1.1 Motivación y objetivos

base níquel hace necesario emplear bajas velocidades de corte y asumir un rápido desgaste de las herramientas y en consecuencia reducidas vidas de las mismas. La aparición de nuevos materiales de corte basados en nitruro de boro cúbico (CBN) con menor contenido de CBN y mayor tenacidad ha permitido desarrollar herramientas comerciales de tipo PCBN (nitruro de boro cúbico policristalino) con afilados suficientemente agudos como para ser aplicadas en el acabado de superaleaciones base níquel, permitiendo mantener la integridad superficial del componente, y empleando velocidades de corte muy superiores a las recomendadas para herramientas de metal duro. Actualmente, existe poca información en relación con la aplicación de herramientas PCBN en operaciones de mecanizado de acabado de estos materiales.

Debido a la reducida maquinabilidad de las superaleaciones de base níquel se recomienda emplear fluido de corte para reducir la temperatura en la interfaz de contacto, la fricción y para facilitar la evacuación de la viruta. Sin embargo, debido a los costes asociados al fluido de corte y a su impacto medioambiental por ser un residuo peligroso se buscan alternativas que reduzcan su uso o incluso permitan su eliminación. En trabajos previos desarrollados por investigadores del grupo de investigación FABDIS en el que se ha desarrollado esta tesis se ha determinado que en determinadas condiciones es posible el mecanizado de acabado en seco de Inconel 718 empleando herramientas de metal duro. Sin embargo, todavía no se ha determinado la viabilidad del mecanizado en seco con herramientas PCBN.

Por otro lado, existen otras estrategias de refrigeración como la introducción de fluido de corte a alta presión con las que se han obtenido buenos resultados en mecanizado de Inconel 718 en relación con la reducción del desgaste de la herramienta de corte. La refrigeración a alta presión presenta una mayor capacidad para introducirse en las interfases herramienta-viruta-pieza y facilitar la rotura de la herramienta. Con ello, se reduce el área de contacto y la fricción con lo que se obtienen menores fuerzas de mecanizado y temperaturas en la zona de corte.

El objetivo principal de esta tesis es el estudio del desgaste de las herramientas PCBN en operaciones de acabado en torneado de Inconel 718 para un amplio rango de parámetros de corte con diferentes condiciones de refrigerante: seco, fluido a presión convencional y fluido a alta presión.

Para ello, se emplearon dos metodologías de estudio. Por un lado, se realizaron ensayos de mecanizado con un amplio rango de parámetros de corte, diferentes tipos de herramientas PCBN y aplicando diferentes técnicas de refrigeración. Para disponer de resultados en condiciones de mecanizado industriales convencionales también se realizaron ensayos empleando herramientas de metal duro. La segunda metodología aplicada consistió en el desarrollo de modelos numéricos basados en elementos finitos para analizar magnitudes implicadas en el mecanizado de difícil determinación experimental. El principal objetivo de estos trabajos fue determinar la viabilidad de aplicar herramientas PCBN al acabado de Inconel 718 y determinar la influencia de las condiciones de corte en la productividad del proceso y en la integridad superficial del componente.

Para alcanzar el objetivo principal ha sido necesario completar los siguientes objetivos parciales:

- Realizar ensayos de torneado en operaciones de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN. Estos ensayos tendrán como finalidad analizar la viabilidad de las herramientas PCBN al mecanizar Inconel 718 en comparación con las herramientas de carburo cuya viabilidad ya ha sido demostrada. Además, la integridad superficial obtenida en el mecanizado se analizó debido a la importancia que tiene en operaciones de acabado de componentes de elevada responsabilidad. Para la consecución de este objetivo se ensayó un amplio rango de parámetros de corte y diferentes herramientas.
- Determinar la influencia de distintas estrategias de refrigeración en el mecanizado de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN. Se analizaron tres técnicas diferentes: Ausencia de fluido de corte, fluido de corte a presión convencional (7,5 bar) y fluido de corte a alta presión (70 bar).
- Desarrollo y validación experimental de un modelo numérico 2D de corte ortogonal de Inconel 718 con herramientas PCBN. El objetivo de este modelo fue profundizar en el conocimiento de variables en la zona de corte de difícil medición como temperaturas, longitud de la zona de contacto herramienta-viruta o deformaciones en el material.

### 1.2. Introducción al mecanizado

Los procesos de mecanizado se caracterizan por la obtención de la geometría final de una pieza, a partir de una preforma o material de trabajo de partida, mediante la eliminación del material sobrante en forma de virutas. Dependiendo de las características del proceso de eliminación de material se pueden agrupar en diferentes categorías: procesos de corte donde se usa una o varias herramientas con geometría definida; procesos abrasivos como el pulido o técnicas más avanzadas que usan métodos químicos, térmicos hidrodinámicos o eléctricos.

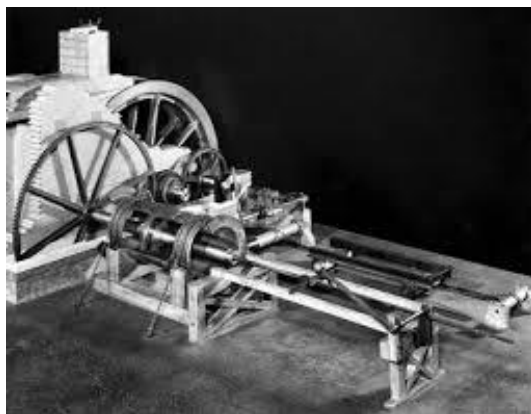
Una de las principales ventajas de los procesos de mecanizado es la capacidad de obtener piezas con muy buenas tolerancias. Otros métodos de fabricación como la forja o el moldeo no pueden alcanzar las tolerancias y precisiones que se pueden alcanzar con el mecanizado. Además, existen otras razones por las que el mecanizado de materiales es necesario como:

- En piezas sometidas a un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades puede ser necesario el uso de alguna operación de acabado como una operación de rectificado para alcanzar las dimensiones finales.
- El mecanizado posibilita también la creación de superficies texturizadas o con otras características especiales.
- El mecanizado puede ser un proceso de fabricación económico, especialmente cuando el volumen de producción es pequeño.

## 1.2 Introducción al mecanizado

Sin embargo, este tipo de proceso tiene limitaciones: parte del material de partida es eliminado para conformar la pieza final, en general es un proceso relativamente caro tanto en términos monetarios como temporales, está limitado en cuanto a las geometrías que pueden obtenerse y además debe controlarse el posible daño provocado en la superficie del componente (tensiones residuales, cambios microestructurales, endurecimiento, etc.).

Los procesos de eliminación de material han sido indispensables en los últimos siglos y han estado en continuo desarrollo y evolución en función de los nuevos materiales. El mecanizado por arranque de viruta ha estado presente desde los egipcios con el desarrollo de un taladro, torno de pedal en el siglo XIII, torno de Leonardo da Vinci en el siglo XV. Sin embargo, la mandrinadora de John Wilkinson del siglo XVIII fue la primera máquina-herramienta industrial según diferentes autores. Esta herramienta se alimentaba mediante accionadores hidráulicos y aportaba suficiente precisión para la fabricación. En la actualidad tenemos nuevas tecnologías que pueden ser usadas como métodos de eliminación de material como corte por láser, fresado electroquímico, etc. Además de máquinas más evolucionadas que pueden ser controladas mediante ordenador haciendo los procesos más estables y precisos. En la Figura 1 se puede observar la mandrinadora de John Wilkinson y una fresadora actual.



a)



b)

**Figura 1.** a) Mandrinadora de John Wilkinson, b) Fresadora CNC 5 ejes de HAAS (UMC-500SS)

El proceso de mecanizado por arranque de viruta tiene como su actor principal a la herramienta de corte que se encarga de eliminar el material para dar la geometría deseada a la pieza, por ello la selección de una adecuada herramienta y las condiciones de corte para el mecanizado del material puede tener un gran impacto en términos de calidad de la pieza y en términos económicos. El desarrollo de herramientas está en continua evolución, la aparición de nuevos materiales con propiedades mecánicas superiores como los materiales compuestos o nuevas superaleaciones hace necesario una evolución pareja de las herramientas de corte.

El torneado es un proceso de mecanizado por arranque de viruta utilizado para fabricar productos de revolución. Existen numerosos productos fabricados con estas técnicas, debido a las ventajas ya comentadas inherentes a los procesos de arranque de viruta. El



torneado se basa hacer girar a la pieza de trabajo por medio del torno para que al mismo tiempo que gira y por medio de movimientos lineales de una herramienta de trabajo se vaya eliminando material en forma de viruta hasta llegar a la geometría deseada. Dentro de las operaciones de torneado, hay que destacar dos por encima del resto por ser las operaciones más comunes:

- Cilindrado, consiste en la reducción del diámetro de la pieza de partida por medio de un movimiento lineal de la herramienta en dirección paralela al eje de giro de la pieza de trabajo.
- Refrenado, consiste en la reducción del largo de la pieza de trabajo por medio de un desplazamiento de la herramienta perpendicular al eje de giro de revolución.

Además, existen otras operaciones que se pueden llevar a cabo con plaquitas especiales como puede ser ranurado, roscado, moleteado, taladrado, etc.

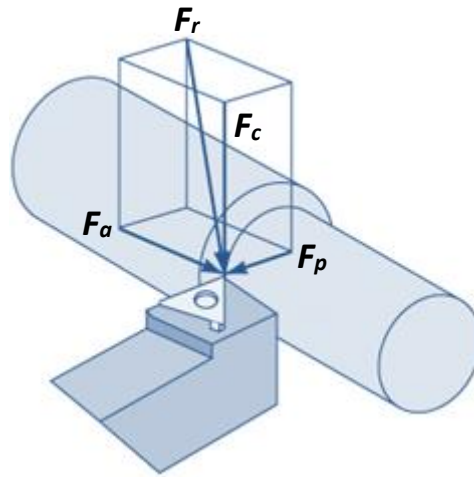
Dependiendo del material de trabajo que se tenga en el torno y de las operaciones de torneado a realizar existen diferentes materiales y geometrías de herramienta disponibles. Además, también se ha de seleccionar parámetros de corte como la velocidad de corte, avance o la profundidad de pasada junto con la geometría de la propia herramienta de corte. Debido al constante desarrollo de nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas que dificultan su mecanizado, existe un gran interés en investigar como mecanizar estos nuevos materiales de una forma eficiente.

### **1.2.1. Fuerzas de mecanizado**

Las fuerzas de corte originadas al mecanizar una pieza en torno se descomponen en tres direcciones ortogonales nombradas según el parámetro de corte que corresponda, a continuación se describen las fuerzas:

- Fuerza de corte ( $F_c$ ): Componente de la velocidad de corte y por tanto es tangencial a la superficie mecaniza.
- Fuerza de avance ( $F_a$ ): fuerza paralela a la dirección de avance, esta corresponde con la dirección de movimiento de la herramienta en operaciones de torneado.
- Fuerza de penetración ( $F_p$ ): fuerza perpendicular a la fuerza de corte y avance y paralela a la profundidad mecanizada.
- Fuerza resultante ( $F_r$ ): Fuerza total correspondiente al mecanizado.

En la Figura 2 se puede ver como se distribuyen las fuerzas en una operación de torneado en las tres direcciones y la componente resultante de las fuerzas.



*Figura 2. Fuerzas de mecanizado.*

### 1.2.2. Temperatura en los procesos de mecanizado

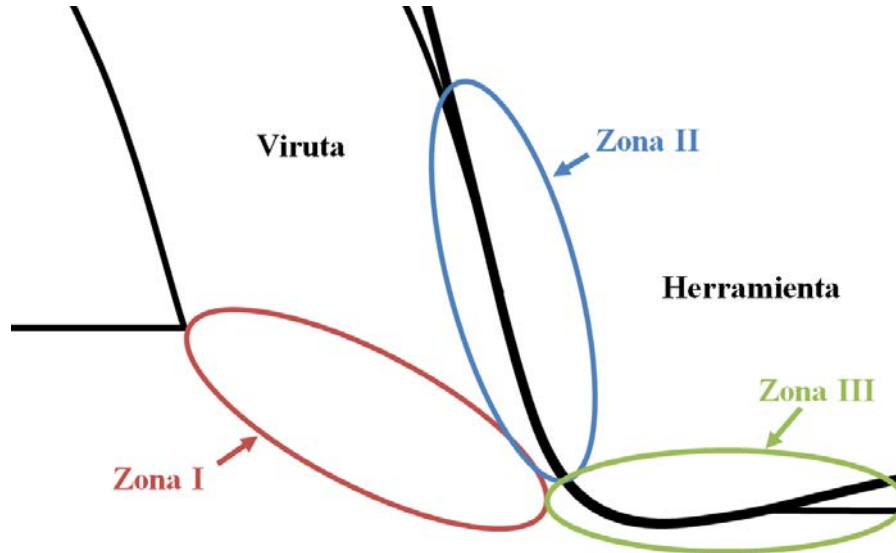
La distribución de la temperatura en los procesos de arranque de viruta juega un papel importante debido a que puede afectar directamente a las propiedades de la herramienta de corte reduciendo la dureza o la resistencia al desgaste y por consiguiente reduciendo la duración de estas. Además, la presencia de elevadas temperaturas puede afectar a la superficie mecanizada reduciendo sus propiedades mecánicas y la vida en servicio del componente fabricado. Otra problemática es un peor control dimensional debido a pequeñas variaciones dimensionales debido a las altas temperaturas [1].

El calor generado en los procesos de mecanizado se produce principalmente debido a la energía de rozamiento y energía plástica que transforma la energía mecánica en calorífica. Sin embargo, la energía elástica suele almacenarse en el propio material y no genera calor.

El calor generado se suele dividir en tres zonas donas diferentes debido a la generación de elevadas temperaturas en estas localizaciones. Estas zonas también se corresponden con grandes deformaciones elásticas y plásticas. A continuación, se explican las tres zonas y se muestran en la Figura 3.

- Zona I: la zona primaria se presenta delante de la herramienta y es la zona con las mayores deformaciones plásticas. Está presente en el plano de cizalladura y es la localización donde se producen las mayores deformaciones debidas al corte del material. En esta zona se genera en torno al 80 % del calor generado en todo el proceso.
- Zona II: la deformación secundaria se origina debido a la fricción existente al deslizar el material que se ha convertido en viruta sobre la superficie de desprendimiento. Debido a las elevadas temperaturas entre herramienta y pieza de trabajo se puede observar la presencia de material adherido que se denomina filo recrecido, esto puede variar la geometría de la herramienta y afectar tanto a vida como acabado superficial.

- Zona III: La zona terciaria se origina cerca de la en la superficie de incidencia de la herramienta debido al rozamiento existente entre la superficie mecanizada y la herramienta. Las deformaciones y temperaturas de esta zona afectan directamente al acabado superficial final. Sin embargo, el valor de la presión y temperatura suele ser más reducido que en la zona II.



*Figura 3. Principales zonas térmicas producidas en el mecanizado.*

El calor originado en la zona primaria y terciaria se suele evacuar mediante conducción y convección, aunque como se ha mencionado anteriormente el calor generado puede afectar a la integridad superficial. La zona secundaria puede presentar problemas debido a que el calor se distribuye entre la herramienta y la viruta generada, que puede originar adhesión en el filo.

Aunque los procesos de arranque de viruta tengan tres zonas diferenciadas de generación de calor, la distribución de las temperaturas dependerá de las propiedades térmicas de la herramienta y material, recubrimientos, parámetros de corte o el uso de algún refrigerante.

Por ello el empleo de fluido de corte se usa tanto para la lubricación como la refrigeración. De esta manera se mejora la evacuación de temperaturas en las zonas principales de calor y se reduce la fricción entre las superficies en contacto de la herramienta y pieza de trabajo.

### **1.2.3. Operaciones de acabado**

El acabado es un proceso de fabricación el cual se emplea para darle unas características específicas a una pieza en función de la aplicación que tenga. El acabado superficial es un parámetro importante del estado del componente ya que puede afectar no solo al apartado visual sino también a su estado, funcionamiento, duración o rendimiento.

Tradicionalmente el acabado de las piezas era una variable que se cuantificaba desde el punto de vista de la estética de la superficie (dentro de unos valores normales). Hoy en

## 1.2 Introducción al mecanizado

día las grandes exigencias del producto y alta competitividad han hecho necesario que esta operación sea una variable a tener muy en cuenta en la fase de diseño de producto [Norma UNE 82-315/86]. Las principales variables afectadas por el acabado superficial de una pieza son:

- Estético: Puede afectar directamente a la decisión de un comprador que un acabado sea deficiente.
- Esfuerzos mecánicos. Durante las operaciones de acabado se puede llegar a endurecer las superficies mecanizadas por deformación causando fragilidad en la pieza.
- Resistencia a fatiga. Las operaciones de acabado pueden aumentar la resistencia a fatiga de los componentes además de eliminar grietas pequeñas en la superficie de la pieza, mediante la creación de tensiones superficiales de compresión.
- Limpieza. Un acabado superficial sin irregularidades es menos propicio a que se ensucie por contaminantes.
- Propiedades mecánicas de la superficie. Un acabado superficial puede mejorar las propiedades mecánicas en la superficie dependiendo de la aplicación.
- Resistencia a corrosión. Una capa superficial de óxido puede proteger la pieza fabricada frente a la corrosión.
- Tolerancias dimensionales. Las elevadas exigencias de fabricación elevan la dificultad de fabricar piezas con más exactitud. Por ello las operaciones de acabado pueden mejorar esta presión.
- Rugosidad. La rugosidad suele identificarse con la calidad del acabado superficial.

Existen distintos métodos para afectar las variables descritas anteriormente a parte de las inherentes a los procesos de fabricación seguidos para alcanzar la forma final de la pieza.

La formación de recubrimientos sobre las piezas puede mejorar el comportamiento y aumentar la protección de las piezas. Estos se suelen dividir en:

- Electrolítico: consiste en depositar mediante electroquímica capas de metal sobre una pieza sumergida en una solución de iones metálicos.
- Recubrimiento orgánico: mediante deposición de polímeros o resinas producidas de forma natural depositadas y endurecidas en la superficie.
- Recubrimiento inorgánico: basados en materiales aglutinantes que suelen ser recubrimientos transparentes pigmentados que forman películas para proteger de los efectos ambientales.

También existen procedimientos para limpiar la superficie eliminando asperezas como puede ser mediante chorro de arena, barrilado o métodos para aumentar la dureza superficial y la resistencia a fatiga mediante la acción de un chorro de perdigones

metálicos sobre la superficie de la pieza en una corriente de aire controlada (*Shot Peening*).

En operaciones de acabado mediante arranque de viruta en torno el principal objetivo es alcanzar la máxima precisión en la superficie mecanizada y mejorar la calidad superficial.

### 1.2.4. Rugosidad

Los procesos de fabricación ya sea con o sin arranque de viruta originan discontinuidades en la superficie de las piezas fabricadas. Estas discontinuidades pueden originar defectos los cuales pueden ser críticos dependiendo de la aplicación de la pieza. Es por ello que es necesario estudiar esta superficie mecanizada mediante la rugosidad.

La rugosidad superficial tiene varias normas para definir la calidad, valores críticos, mediciones etc. Las tres normas son:

- UNE 82301 (ISO 468): Rugosidad superficial. Reglas generales para determinar las especificaciones. Además de valores y parámetros permitidos.
- UNE-EN ISO 4287: Especificación geométrica de productos. Especificación de la calidad de la superficie en función del perfil de la superficie, definiciones y parámetros de la calidad superficial
- UNE 1037 (ISO 1302): Descripción de los estados superficial en los dibujos técnicos.

El acabado superficial suele evaluarse por medio de la medición de la rugosidad. Esta variable cuantifica las desviaciones verticales de una superficie con respecto a una dada como referencia. Para analizar la rugosidad se ha de definir varios parámetros en la superficie que se desee medir:

- Superficie geométrica. Superficie ideal cuya forma viene definida por la geometría de un plano.
- Superficie real. Limite real de la superficie definido por el medio que lo rodea.
- Perfil transversal. Perfil resultante por la intersección de un plano perpendicular con la superficie real de la pieza.
- Longitud básica (l): longitud de la línea de referencia usada para separar las irregularidades de la superficie.
- Longitud de evaluación (ln): longitud definida para determinar los valores de rugosidad superficial, puede estar comprendido por una o más longitudes básicas.
- Desviación: Distancia entre el punto de perfil y la línea de referencia.

## 1.2 Introducción al mecanizado

- Línea media de mínimos cuadrados (m): línea de referencia de la longitud básica donde la diferencia de los mínimos cuadrados de las desviaciones en esta línea es mínima.
- Línea media aritmética: Línea de referencia paralela a la dirección general del perfil dentro de la longitud básica.

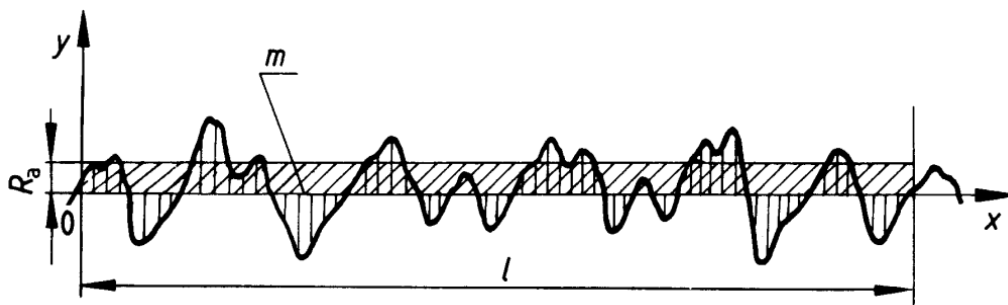
Con todo esto se puede definir la rugosidad como el conjunto de irregularidades superficiales de paso pequeño en la superficie real. En procesos de mecanizado estas se originan por desajustes, por vibraciones entre la herramienta y pieza de trabajo, por desgaste, o simplemente por el comportamiento del mecanizado. Para definir esto es necesario definir los parámetros más importantes de la rugosidad [2]:

- Altura máxima del perfil ( $R_y$ ): distancia máxima entre valor máximo de pico y el mínimo de fondo de la rugosidad en la longitud característica.
- Altura de irregularidades en diez puntos ( $R_z$ ): Medida de los valores de las alturas de 5 puntos máximos y mínimos dentro de una longitud característica.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (1)$$

- Rugosidad media aritmética ( $R_a$ ). Se define como la media aritmética de los valores absolutos de los puntos del perfil de rugosidad en función de la línea media. Esto se puede observar en la Figura 4. Es decir, la rugosidad media aritmética se puede definir como la altura de un rectángulo cuya base es la línea de medición y el área es la misma que la del perfil delimitado por la línea media. La ecuación para calcular la rugosidad media aritmética es:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2)$$



**Figura 4.** Rugosidad media aritmética.

El valor de la rugosidad media aritmética normalmente se define en  $\mu\text{m}$ . Este método es el más usado en líneas de producción y en operaciones de mecanizado como torno o fresa debido a la facilidad de obtener este resultado. Además, es

aplicable en casi todos los procesos de fabricación Este es el parámetro más usado, pero también existen otros como: Rugosidad media cuadrada, altura máxima, profundidad total, etc. En función de la aplicación será necesario estudiar uno o más parámetros de la rugosidad.

Sin embargo, presenta ciertas desventajas, la presencia de un gran pico o valle hace que la medida de la rugosidad no se represente fielmente alterando el valor de medidas. Además, no define la irregularidad de un perfil ni distingue entre picos y valles. No es aplicable en materiales sintetizados debido a la gran diferencia entre picos y valles existentes en estos procesos.

- Desviación media cuadrática ( $R_q$ ): Valor medio cuadrático de las desviaciones del perfil en la longitud básica.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^w(x) dx} \quad (3)$$

Aparte de estos también existen otros como la longitud portante del perfil ( $\eta_p$ ) que es la suma de las longitudes al cortar el perfil por una línea paralela a la línea media en una longitud básica o la tasa de longitud portante que es la relación entre la longitud portante y la longitud básica.

Un instrumento típico para la medida de la rugosidad superficial es un rugosímetro de palpador metálico. Este se basa en amplificar la señal eléctrica producida por las irregularidades del perfil superficial de una pieza al recorrer el palpador un plano. De esta manera se puede calcular los parámetros de rugosidad definidos anteriormente en función de la longitud y número de muestras que se deseen obtener. Este rugosímetro puede tener un palpador piezoeléctrico (deformación de un material piezoeléctrico), capacitivo (condensador) o inductivo (circuito magnético).

### 1.2.5. Refrigerante

La selección del fluido de corte es una tarea importante en procesos de mecanizado ya que puede afectar a la productividad en términos de calidad de pieza fabricada y durabilidad de las herramientas. Además, también tiene un factor medioambiental de gran importancia. El uso de fluido de corte ha sido ampliamente usado en la industria con en el fin de mejorar la maquinabilidad de los materiales, las principales causas se exponen a continuación:

- Reducir la fricción entre la herramienta y pieza de trabajo, y por lo tanto el desgaste de las herramientas de corte. Esto también proporciona una mejora del acabado superficial en la pieza mecanizada.
- Reducción considerable de las fuerzas y de la energía necesaria para mecanizar que por tanto disminuye el consumo de potencia.
- Mejor control de viruta.

## 1.2 Introducción al mecanizado

- Reducción de la temperatura y distorsión térmica en el área de corte.
- Proteger la superficie mecanizada de corrosiones.

Dependiendo de la aplicación de mecanizado que se esté realizando es necesario un fluido de corte u otro, dependiendo de las condiciones de corte y material a mecanizar se pueden originar elevadas temperaturas en la herramienta y por tanto la necesidad de mayor lubricación.

También se ha de tener en cuenta que aunque la presencia de fluido de corte suele ser beneficiosa, también puede empeorar el comportamiento del mecanizado en ciertas condiciones. Por ejemplo, en situaciones de mecanizado interrumpido como puede ser en fresado, puede incrementar la fatiga térmica en el filo. Además, la acción del fluido de corte incrementa la curvatura de la viruta haciendo que el contacto se concentre en una zona menor del filo de la herramienta, esto origina tensiones y temperaturas elevadas que pueden reducir su vida.

Los principales efectos que surgen con la presencia de un lubricante en operaciones de torneado en producción se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Efectos sobre la pieza de trabajo: Se debe tener en cuenta que la presencia de fluido de corte en mecanizado puede originar un aumento de las tensiones residuales y posible corrosión. Los fluidos que contienen cloro por ejemplo no deben usarse con titanio. Además, se ha de limpiar siempre la pieza de trabajo para retirar todo el fluido de corte presente, esto en producción puede una gran desventaja debido al coste y tiempo que origina esta operación, por ello es recomendable el uso de fluido con baja viscosidad.
- Efectos sobre la herramienta de corte: Al igual que para el material de la pieza de trabajo también puede tener un comportamiento adverso para las herramientas de corte. Se ha de considerar un fluido compatible con los materiales usados en el mecanizado tanto metálicos como no metálicos
- Efectos sobre la salud: Uno de los principales problemas es el efecto negativo que puede tener el respirar los vapores generados durante el mecanizado con estas herramientas de corte que puede originar problemas respiratorios.
- Impacto medioambiental: Una vez que los fluidos de corte han agotado su vida deben ser gestionados como residuos peligrosos. Por ello, el mecanizado en seco o la aplicación de otros sistemas de refrigeración como MQL han surgido como opciones importantes pero que tienen sus limitaciones.

Para refrigerar la herramienta existen diferentes métodos. El método convencional consiste en el aporte de grandes caudales de fluido a presión convencional sobre la zona de contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta. Sin embargo, el problema de las altas temperaturas alcanzadas en el área de contacto no se solucionaba para todas las aplicaciones siguiendo el procedimiento convencional. Aunque supone un mayor coste, la aplicación de fluido de corte a alta presión puede ser una opción interesante por sus beneficios en relación con la refrigeración a presión convencional como su mayor

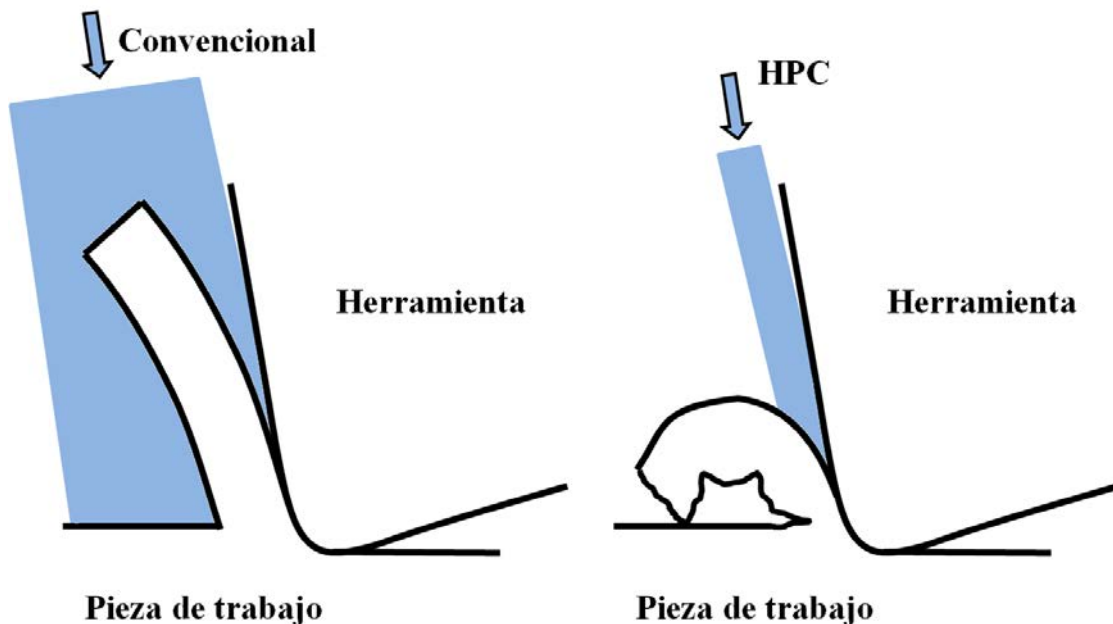


capacidad de refrigeración. A continuación, se describen algunas de las alternativas a la aplicación de fluido de corte convencional de más interés.

### 1.2.5.1. Fluido de corte a alta presión

Debido a la aparición de nuevos materiales y nuevas herramientas durante los últimos años que originaban temperaturas elevadas en el área de corte, se empezó a introducir fluido de corte a elevadas presiones para eliminar el calor generado en la zona de contacto entre la herramienta y la pieza.

Las elevadas presiones del fluido de corte actúan como un rompedor de la viruta generada durante el mecanizado, esta viruta tiende a ser más segmentada a altas presiones, lo cual es una ventaja, ya que se evitan problemas relacionados con virutas de corte de largas longitudes, que pueden romper alguna herramienta atascándose en alguna zona o empeorando el mecanizado. En la Figura 5 se puede observar la diferencia entre usar fluido convencional o fluido a alta presión [3].



**Figura 5.** Comparación de la rotura de viruta para fluido de corte a presión convencional y a alta presión [4]

HPC (*High Pressure Cooling*) se denomina a la introducción de fluido a alta presión, tiene una limitación debida a las partículas introducidas a alta presión por el inductor, ya que estas pueden producir daño debido al impacto de partículas en la pieza de trabajo o herramienta. Para ello el fluido de corte se debe filtrar adecuadamente siendo el valor límite de tamaño de partículas de 20  $\mu\text{m}$ .

La introducción de este fluido se puede hacer mediante flujo individual o doble. El principal es el que apunta a la cara de desprendimiento en el punto óptimo. Además, la presencia de un segundo flujo de refrigerante suele ser inducida a la cara de incidencia cerca de la zona terciaria, maximiza el control de la viruta y reduce la temperatura en el

## 1.2 Introducción al mecanizado

área de corte. Esta técnica permite ir a velocidades más altas, además de ofrecer vidas de herramientas más largas debido a la mejor lubricación y refrigeración.

### 1.2.5.2. MQL (Minimum Quantity Lubrication)

MQL o cantidad mínima de lubricación es una técnica que surgió para solucionar los problemas y peligros medioambientales causados al usar el fluido de corte convencional. Esta técnica se basa en introducir una cantidad mínima necesaria de fluido de corte en la zona de la punta de la herramienta. Este refrigerante suele ser un aceite vegetal o un éster biodegradable pulverizado con aire. El uso de técnicas MQL puede llegar a tener unos beneficios similares a los obtenidos con los métodos convencionales de refrigeración en términos de vida de herramienta.

Se han obtenido buenos resultados en operaciones de torneado con técnicas de MQL de refrigeración, principalmente por la buena introducción del fluido entre las superficies de contacto entre herramienta, viruta y pieza de trabajo. Además de una reducción considerable de la temperatura en el área de corte por el enfriamiento debido al aire comprimido y por la evaporación del refrigerante que absorbe gran cantidad de la energía. Sin embargo, la principal desventaja del método MQL es la aparición de vapores que pueden presentar un riesgo elevado para la salud de los operarios, pudiendo minimizarse este efecto negativo por medio del uso de extractores.

### 1.2.5.3. Refrigeración Criogénica

La refrigeración criogénica es una técnica de refrigeración que permite mantener la temperatura entre las zonas de contacto pieza-herramienta muy por debajo a la temperatura de reblandecimiento del material. Sin embargo, si esta refrigeración no tiene un control adecuado puede provocar daños en la superficie a través de alteraciones físicas y químicas que inducen pequeñas grietas y tensiones residuales. El principio de la criogenización es dirigir un flujo de gases licuados a alta presión a la superficie de incidencia y de desprendimiento para mejorar el rendimiento de la herramienta en procesos de torneado. El fluido de corte más usado es el nitrógeno líquido debido a su reducido coste y a su bajo impacto medioambiental [5].

### 1.2.6. Herramientas de corte

La selección de la herramienta de corte en un mecanizado es una de las tareas más importantes. La elección de la herramienta adecuada en función del material de trabajo y condiciones en las que se realizaran los procesos, son factores importantes a la hora de analizar la viabilidad de un proceso. Las herramientas de corte están expuestas a elevadas temperaturas y esfuerzos en las zonas de contacto con la pieza, es por ello, que estas herramientas han de poseer las siguientes características:

- Dureza, la herramienta ha de tener una gran dureza, mayor que la que tenga el material a mecanizar para prevenir en la medida de lo posible fenómenos de abrasión.
- Tenacidad, debido al impacto que sufren las herramientas en operaciones de corte donde las herramientas se ven sujetas a fluctuaciones de las fuerzas de corte.
- Resistencia a desgaste, se debe tener un tiempo de vida de la herramienta aceptable dentro de la producción hasta que sea reemplazada por otra herramienta.
- Resistencia a elevadas temperaturas, se debe asegurar una buena estabilidad frente a las elevadas temperaturas presentes en el mecanizado.
- Estabilidad química, no se debe permitir ninguna reacción química entre la pieza de trabajo y herramienta que sea adversa a al desgaste de la herramienta.

Existen un gran número de herramientas de corte en función de sus propiedades, en especial, de las propiedades mencionadas anteriormente que son críticas en procesos de mecanizados. Herramientas de aceros al carbono y de media aleación, carburo, cerámicas, aleaciones de cobalto etc. Han sido usadas en distintas aplicaciones de mecanizado[3]. A continuación, se exponen los materiales de herramientas más usados:

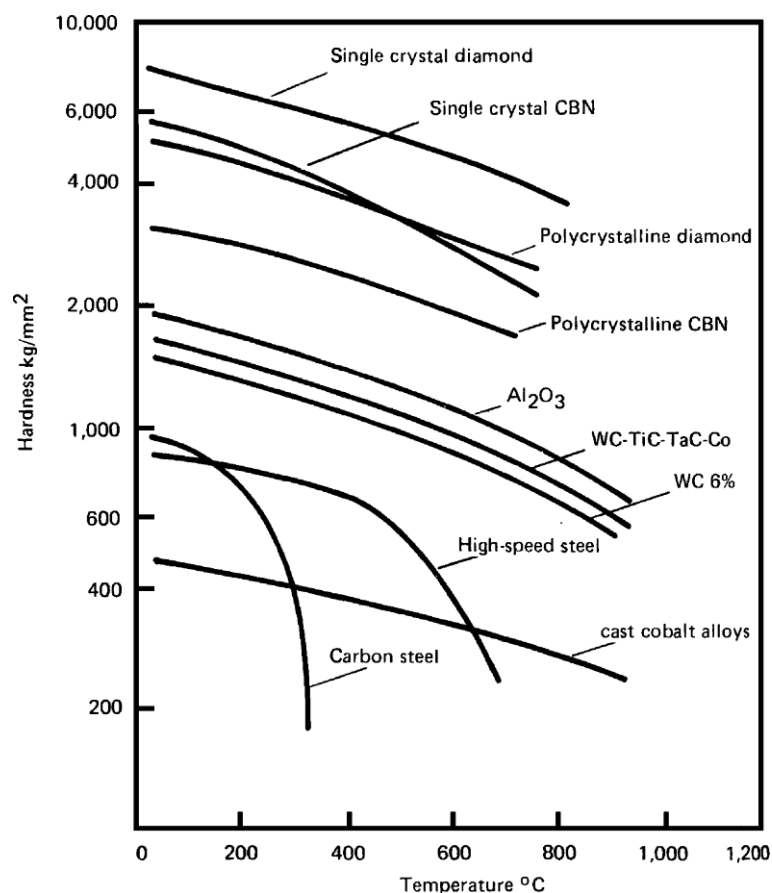
- Acero rápido, también se denominan HSS (*High Speed Steels*), son aceros que tienen un alto contenido en carbono con diferentes elementos aleantes. Las herramientas de aceros rápidos suelen estar basadas en wolframio o en molibdeno. Estos materiales son aptos para aplicaciones donde no se superen temperaturas de 500 °C.
- Metal duro, o herramientas de carburo, se obtienen en la sinterización de carburo de tungsteno y cobalto a alta temperatura. Estas herramientas poseen una elevada dureza y soporta temperaturas en torno a los 900 °C. La herramienta de carburo es una de las más habituales en los procesos industriales de elevada exigencia debido principalmente a su elevada dureza y capacidad de soportar altas temperaturas.
- Herramientas cerámicas, son herramientas de gran dureza y resistencia a elevadas temperaturas, sin embargo, son herramientas poco tenaces. Por esta razón estas herramientas trabajarán mejor en procesos de corte continuo y peor en procesos de corte intermitente. Las herramientas cerámicas más usadas son: Óxido de aluminio (alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), SIALON (Si, Al, O y N) y nitruro de silicio( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
- Diamante y PCBN. Se producen por la sinterización a alta presión con un conglomerante de matriz metálica o cerámica, de esta manera se forma CBN, PCBN o PCD (diamante policristalino). Son materiales de alta dureza que presentan problemas de fragilidad. Sin embargo, poseen una elevada dureza y estabilidad térmica (1200 °C para CBN y 700 °C para PCD). Debido a su resistencia a altas temperaturas, los mejores resultados se obtienen mecanizando en seco reduciendo costes de refrigeración y los problemas medioambientales.

## 1.2 Introducción al mecanizado

En los siguientes párrafos se desarrollará con mayor detalle la aparición y uso de los dos tipos de herramienta de corte utilizadas en este trabajo (herramienta de carburo y herramientas PCBN).

Las herramientas de carburo o también conocida como metal duro son herramientas fabricadas por un compuesto cerámico de wolframio y carbono. Estas herramientas fueron desarrolladas en la década de 1930 con el fin de mejorar el comportamiento de las herramientas ya existentes. Hasta entonces, herramientas de aleaciones de fundición de cobalto, aceros rápidos o de alta velocidad (HSS) o aceros de carbono habían sido usados en procesos de mecanizado, estas herramientas poseían gran tenacidad y resistencia a impacto sin embargo también poseían alguna limitación, especialmente el de mantener una dureza aceptable a altas temperaturas.

La mejora continua de la producción y los nuevos retos de mecanizar a velocidades de corte más altas fomentó la implementación industrial de las herramientas de carburo, las cuales poseían una gran dureza bajo temperaturas elevadas. Esto se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6.** Dureza típica de los materiales de herramientas frente a la temperatura [6]. Figura reproducida con permiso del propietario de los derechos de autor, E.O Ezugwu

Dos grupos de herramientas de carburo se pueden diferenciar según su material, carburo de tungsteno y carburo de titanio.

El carburo de tungsteno (WC) se puede considerar un material compuesto formado por partículas de carburo de tungsteno unidas con una matriz de cobalto, para la fabricación de estas herramientas debido a la elevada dureza y escasa ductilidad estas se fabrican mediante polvos con un porcentaje de cobalto de entre el 6 y 10 %. A mayor porcentaje de matriz en la herramienta, estas poseen mayor tenacidad, sin embargo, tienen una peor resistencia a desgaste y una dureza inferior.

Por otro lado, el carburo de titanio (TiC) está formado por las partículas de carburo y por una matriz de níquel-molibdeno. Este material se desarrolló para mejorar un desgaste originado en las herramientas WC al mecanizar acero, ya que un desgaste en forma de cráter provocaba una rotura temprana de las herramientas debido a la afinidad química entre pieza y herramienta. Sin embargo, estas herramientas aunque no presenciaban este desgaste se ha de tener en cuenta que no eran tan tenaces.

La clasificación de las herramientas de carburo se realizó de dos maneras distintas, el ANSI (*America National Standards Institute*) lo clasificó en 8 grupos con nomenclatura desde C-1 a C-8 en función de las propiedades y tipo de herramienta, y la de la ISO (*International Organization for Standardization*) el cual divide las herramientas de carburo en función del material que puede mecanizar mediante códigos alfanuméricos y de colores. Esta última es la más usada de manera global.

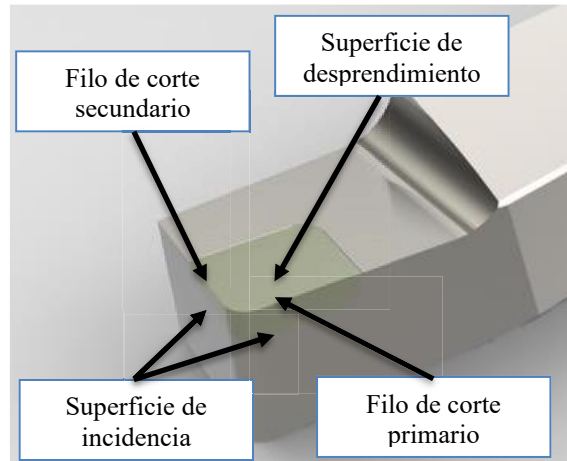
El CBN (*Cubic Boron Nitride*) es el segundo material más duro conocido tan solo superado por el diamante. Las herramientas de CBN se producen por la unión de CBN con un sustrato generalmente de carburo por sintetización de material bajo presión. Mientras que el carburo hace que la herramienta tenga una mayor resistencia a impacto, el CBN proporciona una mayor resistencia a desgaste. CBN posee una alta resistencia a corrosión y reacciones químicas a altas temperaturas, por ello este tipo de herramienta es ideal para mecanizar metales endurecidos a temperaturas muy elevadas.

Además, también existen las herramientas de corte de PCBN (*Polycrystalline cubic boron nitride*) el cual surge de la sintetización de CBN con otro material. PCBN es un material compuesto por compresión de granos CBN con una matriz aglutinante. Dependiendo de la cantidad de CBN se suelen clasificar en dos grupos, bajo contenido o alto contenido de CBN. Alto contenido en CBN se suele denominar para herramientas que tenga un entre el 80-95 % de CBN y normalmente en una matriz metálica. Las herramientas PCBN de bajo contenido en CBN se suelen clasificar debido a su contenido entre el 40-70 %, normalmente se suele introducir con un aglutinante cerámico como TiC y TiN [6].

Sin embargo, este tipo de herramientas es frágil, por esto evitar vibraciones originadas por la máquina o por el sistema de agarre de la herramienta es esencial para evitar una rotura temprana. Además, para evitar problemas de agrietamiento por el choque térmico en la herramienta, el mecanizado se puede realizar en operaciones sin fluido de corte, especialmente en operaciones con interrupciones constantes como puede ser el fresado.

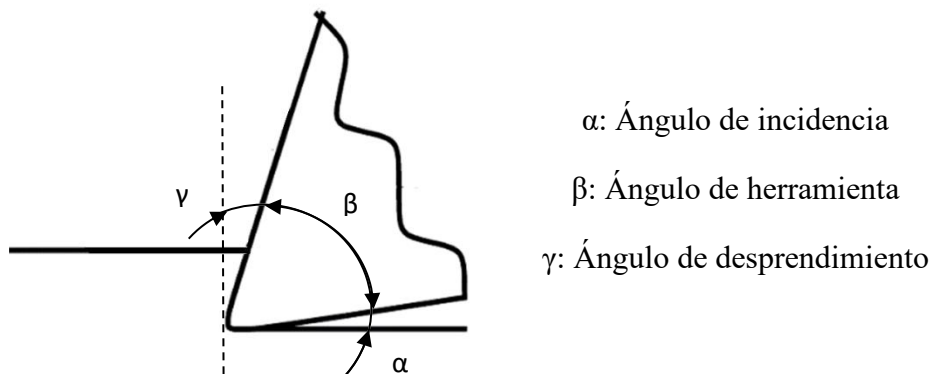
### 1.2.7. Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta es importante, tanto las superficies y filos como ángulos y forma de la herramienta. La herramienta tiene tres superficies principales, se suelen denominar: superficie de desprendimiento, está en contacto con la viruta y es la superficie perpendicular a la sección de viruta sin deformar, y superficie de incidencia primaria y secundaria (ver Figura 7):



**Figura 7.** Partes de la herramienta de corte

Por últimos los ángulos que marcan la geometría de la herramienta también son importantes, principalmente, el ángulo de incidencia, el ángulo de herramienta y el ángulo de desprendimiento. La suma del ángulo de incidencia y ángulo de herramienta se le suele denominar como ángulo de corte. En la Figura 8 se pueden observar los ángulos de la herramienta en operaciones de mecanizado.



**Figura 8.** Ángulos de herramienta de corte

Los ángulos tienen una gran influencia en los procesos de mecanizado, un ángulo de desprendimiento positivo reduce el rozamiento generado entre pieza de trabajo y herramienta, sin embargo, las herramientas suelen ser menos robustas y suelen tener más fragilidad. Los ángulos de desprendimiento negativo producen un mayor rozamiento, que redunda en un mayor consumo de energía por la mayor deformación generada. Valores negativos de ángulos de desprendimiento se suele usar para el

mecanizado de materiales especialmente duros y tenaces, ya que les confieren a las herramientas una mayor robustez.

El ángulo de incidencia evita el rozamiento entre la superficie mecanizada y la herramienta. Suele tener valores positivos entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ , aunque se suele buscar que sea lo menor posible sin que genere a un rozamiento excesivo para que no afecte a la robustez de la herramienta.

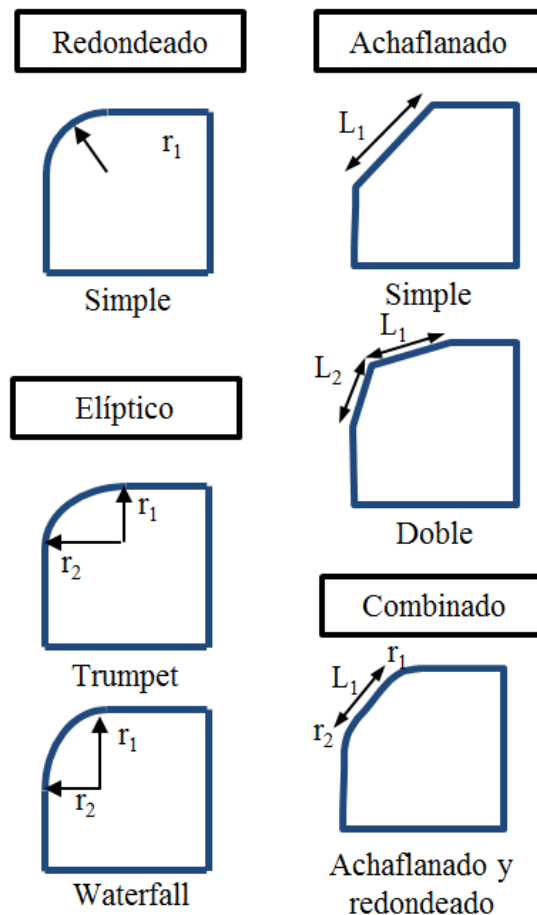
### **1.2.8. Preparación del filo de corte**

Aunque las investigaciones realizadas a lo largo de los últimos 20 años se han centrado en el estudio del material base de la herramienta, la geometría a nivel macroscópico, y distintos tipos de recubrimientos, la preparación del filo juega un papel importante para la selección adecuada de la herramienta en los procesos de mecanizado.

En los últimos años ha surgido un mayor interés por la preparación del filo con diferentes geometrías donde se ha observado que la elección adecuada del filo puede optimizar los procesos de fabricación, en especial en procesos de acabado. Esto se debe principalmente al incremento de la demanda de herramientas de mayor rendimiento debido a la aparición de materiales más tenaces y duros, que hacen que se tengan que desarrollar nuevas herramientas.

La preparación del filo de la herramienta puede afectar a la vida de vida reduciendo los distintos tipos de desgaste, y también puede afectar a la calidad superficial de la pieza de trabajo. Han aparecido diferentes tipos de afilados en función de la geometría, achaflanado, redondeado o elíptico son algunos de las preparaciones más comunes. Los filos de corte redondeados se suelen usar en operaciones de mayor precisión como acabado, semi-acabado y mecanizado de alta precisión. Sin embargo mecanizado con filo achaflanado se suele usar para mecanizado de materiales duros, desbastes o corte interrumpido [7].

Existen numerosas posibles preparaciones del filo de corte tal y como se puede ver en la Figura 9.



**Figura 9.** Geometría de las preparaciones de filo de las herramientas de corte.

El proceso de fabricación de estos filos sigue siendo un reto para muchos fabricantes, dependiendo de la geometría y material se usan distintos procesos de fabricación como chorro arena, cepillado, molienda, *drag finishing* o descargas de plasma [8]–[10]. Es por ello que la preparación del filo se realiza con numerosos objetivos:

- Para aumentar la resistencia del filo de corte.
- Para minimizar el desgaste por astillamiento originado en el filo.
- Para aumentar la vida de la herramienta
- Para preparar la herramienta para la deposición posterior de un recubrimiento.
- Para mejorar la integridad superficial de la pieza mecanizada.

Todo esto se produce debido a que la geometría de la preparación de filo afecta en la distribución de deformaciones, temperaturas, fuerzas y tensiones [11]. Además también afecta a la rugosidad y tensiones residuales de la superficie mecanizada [12]. Tiene un efecto positivo sobre el desgaste debido a que mejora la resistencia y el efecto frente al astillamiento [13]. Además afecta a la topografía del filo de corte y a su superficie de la herramienta, esto genera una microestructura que garantiza la adhesión del recubrimiento a la herramienta y produce un cambio en el coeficiente de fricción entre pieza de trabajo y herramienta [11].



### 1.2.9. Desgaste

El desgaste se define como una pérdida progresiva de material de una superficie que puede afectar directamente en la producción debida a un empeoramiento de la calidad de la pieza fabricada. Esto se debe a que las herramientas están sometidos a altas tensiones, altas temperaturas y a un rozamiento con la pieza de trabajo y la viruta. Estas condiciones hacen que la herramienta se desgaste, y por consiguiente sea necesario cambiarla cuando alcanza un determinado tiempo de uso.

El desgaste normalmente evoluciona de manera gradual, pero depende principalmente del material de trabajo, el material de la herramienta y de las condiciones de corte a las que se está realizando el mecanizado. Este desgaste se puede dividir en distintos grupos según la naturaleza y la región donde apareceré, los principales mecanismos de desgaste de la herramienta son: abrasión, adhesión, oxidación, difusión o afinidad química entre otros.

El desgaste abrasivo es el desgaste más común en las herramientas de corte. Este ocurre cuando partículas duras del material mecanizado roza sobre las superficies de la herramienta, produciéndose así una pérdida de material por abrasión. Este desgaste es el más estable de todos y por ello es el más predecible.

El desgaste por adhesión se produce cuando la pieza de trabajo arranca partículas de material de la herramienta, esto se debe a las altas temperaturas en el área de contacto junto a unas elevadas presiones en el filo hace que se forme una unión mecánica en forma de soldaduras. Esto hace que la superficie de la herramienta sea irregular y produce un crecimiento del filo. El comportamiento ante este desgaste se puede mejorar con el uso de fluido de corte.

La difusión se origina por la alta temperatura entre la herramienta y material de trabajo, este mecanismo de desgaste debilita la superficie de la herramienta. La extensión de este desgaste dependerá entonces principalmente de la temperatura, afinidad entre la herramienta y viruta y el periodo de contacto entre herramienta y material. Esto se produce cuando los átomos de una red cristalina se mueven desde un punto de alta concentración a uno de baja concentración.

Los tres mecanismos de desgastes explicados anteriormente son los principales, pero también existe por oxidación entre la superficie de la herramienta y el oxígeno presente a alta temperatura que oxida la superficie. Cuando esta capa de material se elimina otra capa de óxido se forma en la superficie continuamente. Otro desgaste importante es el de fatiga térmica debido a variaciones cíclicas de la temperatura sobre todo en mecanizados no continuos.

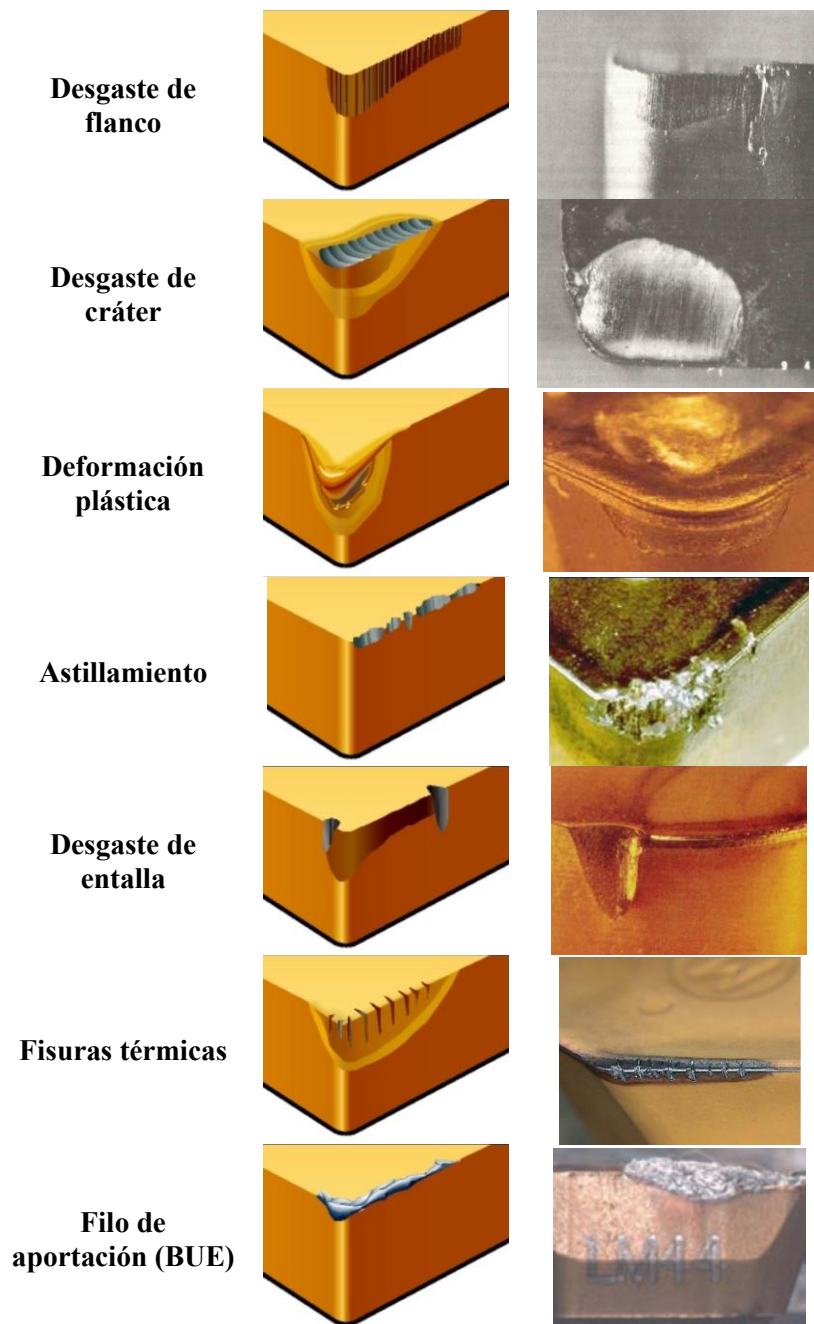
Se han expuesto los principales mecanismos de desgaste. Pero según donde aparezcan y como se originan en la herramienta se les denomina de manera distinta [3], [14]. A

## 1.2 Introducción al mecanizado

continuación, se exponen los principales desgastes originados en las herramientas de corte.

- **Desgaste de flanco:** El desgaste de flanco se presenta en la superficie de incidencia de las herramientas, se debe principalmente al desgaste abrasivo entre la superficie mecanizada y a las elevadas temperaturas que afectan a las propiedades de los materiales en el mecanizado.
- **Desgaste de cráter:** El desgaste de cráter se presenta en la superficie de desprendimiento de la herramienta, este desgaste cambia la geometría de contacto entre herramienta y pieza de trabajo pudiendo afectar al proceso. Se origina principalmente por las altas temperaturas generadas en el mecanizado unido a una afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo. La difusión por altas temperaturas es el principal mecanismo de desgaste.
- **Deformación plástica:** Este tipo de desgaste puede originar un cambio en la geometría del filo ya sea por depresión o elevación. Este desgaste está causado por las altas temperaturas y presiones sobre el material de la herramienta. El principal efecto de este desgaste es un acabado superficial pobre.
- **Astillamiento:** Se denomina astillamiento a una rotura pequeña del filo de corte de la herramienta, normalmente se dividen en tres grupos roturas pequeñas (*microchipping*), roturas grandes o fractura del filo. Este desgaste gradual no es deseable por que puede causar un deterioro de la superficie mecanizada y de la integridad superficial. Las principales causas de este desgaste son por continuos impactos de la herramienta con la pieza de trabajo y por fatiga térmica.
- **Desgaste de entalla:** Producido por la rotura del filo frágil debido a materiales endurecidos durante el mecanizado. Se suele presentar en la zona donde la profundidad de pasada es máxima debido al efecto del material endurecido en la superficie mecanizada
- **Fisuras térmicas:** Pequeñas fisuras perpendiculares al filo de corte que provocan un astillamiento y un acabado superficial deficiente. Está principalmente causado por mecanizado interrumpido o por un suministro de refrigerante variante.
- **Filo de aportación (BUE):** material adherido en el filo por las temperaturas y velocidades de corte. Provoca un acabado deficiente además de posible rotura del filo al arrancar el material adherido.

En la Figura 10 se puede observar los desgastes típicos originados en las herramientas de corte junto con una representación.



*Figura 10. Tipos de desgaste de las herramientas de corte [15]*

### 1.3. Mecanizado de superaleaciones

El desarrollo de nuevos materiales en el último siglo se ha visto incrementado por la demanda de materiales que posean excelentes propiedades. Las superaleaciones son materiales que entre sus principales características tiene una alta resistencia mecánica, alta resistencia a fatiga, estabilidad química y una elevada resistencia a corrosión, unido a unas excepcionales propiedades mecánicas incluso a elevadas temperaturas. Debido a estas propiedades este tipo de materiales se suele usar en aplicaciones de gran exigencia térmica y mecánica como puede ser turbinas de gas, turbinas de aviones, plantas

### 1.3 Mecanizado de superaleaciones

químicas o reactores nucleares debido a las altas temperaturas que alcanzan. En la Figura 11 se puede observar el porcentaje de uso según las aplicaciones donde se puede observar que el 70 % se destina a la industria aeroespacial.

*Figura 11. Porcentaje del consumo de las superaleaciones [6].*

Este tipo de materiales presentan ventajas en comparación con materiales tradicionales como titanio, aluminio o acero, pero sobre todo por su buen comportamiento por encima de los 700 °C, esto se debe a la resistencia a corrosión y alta resistencia química junto con unas buenas propiedades mecánicas. Además, las superaleaciones son materiales más ligeros que los materiales clásicos como el acero. Esto hace que las Superaleaciones sean perfectas para componentes estáticos o rotatorios de partes de motores donde existen elevadas temperaturas debido a la combustión. Debido a estas razones el uso de las superaleaciones en la industria aeroespacial es la más extendida causado por la necesidad de materiales resistente que resistan altas temperaturas y además unido a un menor peso de los componentes implique a un gran ahorro en consumo de combustible y por consiguiente una disminución de la contaminación y de los gastos.

Las aleaciones de titanio son una de las aleaciones donde se ha extendido más uso en la industria aeroespacial por sus buenas propiedades. También han sido usadas diferentes superaleaciones que se clasifican según los compuestos principales que posean: superaleación de níquel, superaleación de cobalto y superaleación base de hierro.

#### **1.3.1. Aleaciones de titanio**

Las aleaciones de titanio se desarrollaron para satisfacer las necesidades en aeromotores debido a sus excepcionales propiedades a bajos ratios de densidad, además poseen una excepcional resistencia a corrosión. En motores se suelen usar en zonas con alta presión y elevadas temperaturas.

Una de las aleaciones cuyo uso está más extendido actualmente es la aleación Ti-6Al-4V que posee un 6 % de aluminio y 4 % de vanadio. Esta aleación suele presentarse en función de su tratamiento térmico que puede ser precipitado o solubilizado, en función de esto las propiedades de dureza y tenacidad pueden cambiar

considerablemente. Esta aleación combina una excelente dureza y una gran resistencia a corrosión que hace ideal en distintos campos como aeronáutico, médico o naval [16].

El mecanizado de las aleaciones de titanio origina fuerzas mayores que aceros de dureza similar. Sin embargo, produce un desgaste de evolución constante que hace que sea fácil de controlar.

### **1.3.2. Superalación de base cobalto**

El principal elemento de esta superaleación es el cobalto como su nombre indica, pero al ser una superaleación se observan otros elementos para mejorar el comportamiento de este material como wolframio, cromo, níquel molibdeno o tántalo.

Su elevada temperatura de fusión y su resistencia a corrosión hacen que este tipo de materiales sea ideal para componentes en turbinas, o incluso para aplicaciones ortopédicas, o en la industria de la medicina donde no se puede permitir corrosión de componentes que pueden estar en continuo contacto con fluidos.

Esta superaleación fue de las más usadas inicialmente, sin embargo, la escasez de cobalto en el siglo XX hizo que se desarrollaran nuevas superaleaciones con otros materiales como las de base de níquel.

### **1.3.3. Superalación de base hierro**

Las superaleaciones de base de hierro se originaron junto con los aceros inoxidable. Los principales elementos de estos materiales son el carbono, wolframio, titanio molibdeno y aluminio. Aunque estos materiales tenían una temperatura de fusión más baja y por tanto una temperatura más reducida que otras superaleaciones presentaban otras ventajas que pueden ser útiles para distintas aplicaciones. Estos materiales se suelen dividir en dos grupos.

- Aleaciones de hierro-cromo-níquel, estas permiten trabajar en un intervalo de temperaturas más bajo, desde 500 °C a 700 °C.
- Aleaciones de hierro-cromo-níquel-cobalto, donde la incorporación de cobalto hace que el rango de temperaturas que puede alcanzar este material es superior al grupo anterior.

El principal uso de las Superalaciones de base de hierro es en procesos químicos como en intercambiadores de calor o equipamiento de tratamiento térmico.

### **1.3.4. Superalación de base níquel**

Las superaleaciones de base níquel son usadas ampliamente en la industria, especialmente en ambientes agresivos debido a su buena resistencia a corrosión, fatiga térmica e impacto térmico [17]. El níquel es el principal componente de esta superaleación, el cual forma una estructura austenítica gamma cúbica centrada en las

### 1.3 Mecanizado de superaleaciones

caras que hacen que tenga una elevada resistencia a corrosión y buenas propiedades a alta temperatura.

La resistencia a oxidación de este material es gracias a la presencia de cromo, pero aparte también hay otros elementos como Nb, Mo, W, V, B y Al para evitar que el cromo se precipite en forma de carburos. El hierro además puede estar presente en estos materiales hasta un 50 % sin que las características de la aleación se vean afectadas. En la siguiente tabla (Tabla 1) se puede observar el uso de otros elementos en superaleaciones de níquel y sus principales propiedades.

**Tabla 1.** *Propiedades en función de la incorporación de elementos químicos a la superaleación de base níquel.*

Elementos de superaleación de base níquel	Razón
Cromo, hierro molibdeno, wolframio, tántalo	Mayor resistencia
Aluminio, titanio	Mayor resistencia a elevadas temperaturas
Aluminio, cromo, tántalo	Resistencia a oxidación
Boro, carbono, circonio	Resistencia a fluencia
Hafnio	Temperatura intermedia de ductilidad que previene la formación de óxidos.

Existen numerosos tipos de superaleaciones de base níquel desarrollado con el fin de solventar diferentes problemas surgidos en distintas aplicaciones. Inconel, Waspaloy, Incoloy, Monel, Hastelloy, Nimonic, etc, son algunas de las superaleaciones de base níquel más usadas. En concreto el Inconel es de la familia de superaleaciones de base níquel y cromo del fabricante *Specials Metals*, es uno de los materiales más usados en la industria, por ello se analizará a fondo esta superaleación, en concreto dentro de los diferentes tipos de superaleaciones de Inconel, este trabajo se centrará con el Inconel 718 que es una de las superaleaciones más usadas en la industria aeroespacial.

Las aleaciones de base níquel son aleaciones de muy baja maquinabilidad que producen fuerte astillado de los filos, adhesión del material, y en general un alto nivel de desgaste en la herramienta de corte. Existen diferentes factores en el mecanizado que explican la baja maquinabilidad de estos materiales [16]:

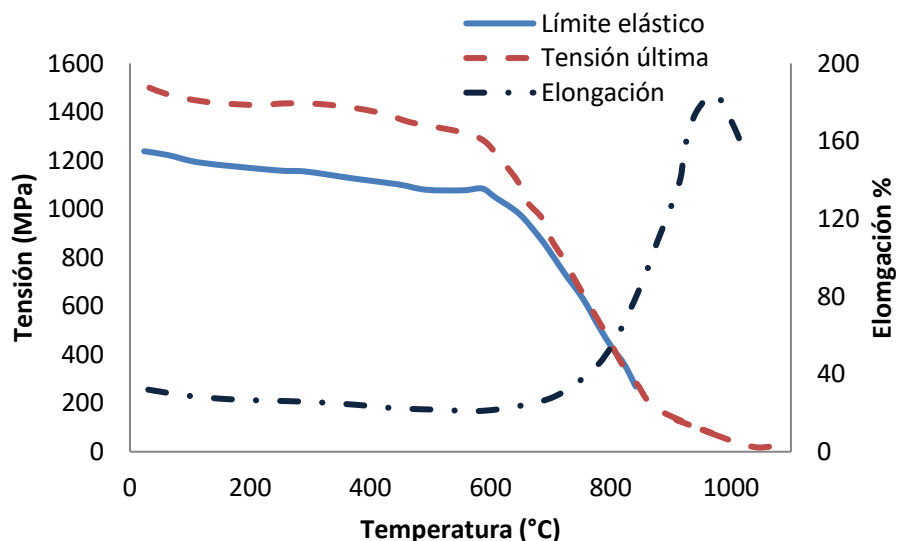
- La deformación plástica forma un papel importante en la generación de calor en la interfaz de mecanizado centrándose principalmente en la zona primaria de mecanizado. El aumento de la temperatura debido a la deformación plástica del material supone aumentos muy grandes de más de 700 °C, sin embargo, estas aleaciones mantienen sus propiedades a elevadas temperaturas lo que hace que no se observe grandes cambios al aumentar la temperatura. Valores de temperatura superiores a los 800 °C sí que reduce la energía necesaria para

mecanizar debido a una reducción de la resistencia. Por ello mecanizar a altas velocidades puede suponer una gran ventaja.

- La energía específica de corte es muy elevada, generalmente debido al efecto de cizallar la superaleación de base níquel y para hacer que el material fluya fuera del contacto. Por esta razón se requiere una herramienta con un filo muy afilado, además se requerirá un filo robusto con ángulo de desprendimiento negativo o cercano a negativo.
- El material endurecido mecánicamente es un gran problema durante el mecanizado de estos materiales. En la zona terciaria se produce un material endurecido en la superficie mecanizada, esta superficie presenta unas propiedades superiores en términos de dureza. Al mecanizar en posteriores pasadas se origina un desgaste de entalla situado a la altura de esta capa endurecida de material. Por ello es recomendable no usar velocidades de corte muy elevada o herramientas demasiado desgastadas que endurezcan más el material.

### 1.3.5. Inconel 718

El Inconel 718 es una superaleación de base níquel-cromo que posee alta dureza, resistencia a corrosión y se puede usar en el rango tipo de temperaturas de  $-252^{\circ}\text{C}$  a  $705^{\circ}\text{C}$ . La alta resistencia a fatiga y agrietamiento unido a una buena resistencia tracción y a fluencia ha dado un amplio uso de esta aleación en la industria como componentes de cohetes, motores de turbinas de gas, tanque criogénico, etc. Estas aplicaciones se deben principalmente a que sus propiedades se mantienen prácticamente estables hasta los  $600^{\circ}\text{C}$  como se observa en la Figura 12.



*Figura 12. Propiedades en función de la temperatura del Inconel 718 [18].*

Las buenas propiedades tanto de resistencia a rotura, fatiga y corrosión unida a una excelente tenacidad a elevadas temperaturas hacen ideal este material a aplicaciones de elevadas exigencias mecánicas a altas temperaturas.

### 1.3 Mecanizado de superaleaciones

Inconel 718 puede representar hasta el 50 % del peso de los motores de las aeronaves siendo el componente principal en discos, álabes y carcasas. Además, también tiene aplicaciones en cohetes y los entornos criogénicos debido a que presenta una buena tenacidad a bajas temperaturas. Estas propiedades son gracias a la presencia de diversos elementos químicos como se puede observar en la Tabla 2.

*Tabla 2. Composición química típica del Inconel 718.*

Níquel (y cobalto)	50,00-55,00 %
Cromo	17,00-21,00 %
Hierro	Balanceado
Niobio(y tántalo)	4,75-5,50 %
Molibdeno	2,80-3,30 %
Titanio	0,65-1,15 %
Aluminio	0,20-0,80 %
Cobalto	Máximo 1,00 %
Carbono	Máximo 0,08 %
Manganeso	Máximo 0,35 %
Silicio	Máximo 0,35 %
Fosforo	Máximo 0,015 %
Sulfuro	Máximo 0,015 %
Boro	Máximo 0,006 %
Cobre	Máximo 0,30 %

El hierro reduce el precio por kilogramo y además le da un efecto de endurecimiento por la baja movilidad del hierro en la matriz, esto reduce la posibilidad de que se originen grietas. El níquel le otorga una gran resistencia a corrosión a elevadas temperaturas hasta de 1000 °C. El cromo mejora la resistencia frente a medios oxidantes. El molibdeno proporciona un aumento de la resistencia de la matriz. Estos son los principales, pero también existen otros compuestos como el carbono que forma carburos metálicos, o niobio, titanio y aluminio que forman precipitados endurecedores.

Para la mayoría de aplicaciones el Inconel 718 se fabrica mediante recocido de solubilización y por envejecimiento térmico también conocido como endurecimiento por precipitación. La fabricación de este material se produce por la precipitación de las fases secundarias en la matriz metálica. La precipitación de las fases de níquel se induce mediante tratamiento térmico desde 600 °C a 815 °C. Para que esto se produzca adecuadamente los constituyentes del envejecimiento (aluminio, titanio, niobio) deben estar disueltos en la matriz, es decir, en solución. Si esto se realiza de algún otro modo, o en alguna otra fase, no se conseguirá precipitar correctamente el material lo que supondrá no tener las mejores propiedades. Por ello este material debe tratarse primero



mediante solución térmica, para ello en Inconel 718 se usan diferentes tratamientos térmicos:

- Recocido de solución de 926 °C a 1010 °C seguido de un enfriamiento rápido que normalmente se realiza en agua, además un envejecimiento térmico a 718 °C durante 8 horas. Por último, un horno a 621 °C un tiempo total de 18 horas y para finalizar una refrigeración por aire.
- Recocido de solución a 1037-1065 °C seguido de enfriamiento rápido en agua, más endurecimiento por precipitación a 760 °C durante 10 horas, se sigue en un horno a una temperatura de 649 °C un total de 20 horas de envejecimiento seguido de un enfriamiento por aire.
- Envejecimiento, este tratamiento produce un aumento de la dureza del Inconel 718 la cual llega a valor de 45 HCR y una tensión última superior. Esto se produce por la precipitación de las partículas de carburos a las uniones de los granos del material.

Debido a las excepcionales propiedades que posee esta superaleación el mecanizado es un reto que se tiene en la industria debido a que se alcanzan temperaturas elevadas durante el mecanizado sobre todo en el filo de la herramienta causado por la baja conductividad del Inconel y la presencia de elementos abrasivos. Sin embargo, considerando su alta resistencia y junto al endurecimiento por deformación de la sección, existen posibilidades para mecanizar estos materiales. El uso de un sistema que rompa la viruta mejorará el acabado superficial de la pieza.

Dependiendo de cómo se haya fabricado la superaleación será más complejo mecanizar este material. Si la pieza ha sido endurecida por envejecimiento el acabado será mejor sin embargo se obtendrán vidas más cortas en las herramientas. Si el Inconel 718 se ha recocido el mecanizado será más fácil y por consiguiente se obtendrá vidas de herramientas superiores. Por todo esto en función del tratamiento térmico que se realice el material tendrá unas propiedades determinadas.

### **1.4. Estructura de la tesis**

Esta tesis se ha estructurado en 4 capítulos claramente diferenciados, siendo este el primero de ellos. En este capítulo se incluye la motivación y objetivos del trabajo realizado, el estado del arte del mecanizado de superaleaciones de base níquel y la estructura de la tesis.

En el segundo capítulo se describe la metodología experimental seguida para la consecución de los objetivos, se describen los materiales elegidos y el equipamiento necesario para realizar los ensayos, por último, se comparan los resultados obtenidos para el mecanizado de Inconel 718.

En el tercer capítulo se presenta el modelo numérico desarrollado para abordar los objetivos marcados en el trabajo. En primer lugar, se describirá el estado del arte actual en modelos de mecanizado. También se describirá como se realiza la validación del

#### 1.4 Estructura de la tesis

modelo numérico mediante ensayos de corte ortogonal. Por último, se analizan los resultados obtenidos.

En el cuarto capítulo se recogen las principales conclusiones de la tesis doctoral obtenidas a partir de los resultados experimentales y del modelo numérico. También se proponen posibles líneas de investigación de futuros trabajos.

Finalmente se muestra la bibliografía consultada para el desarrollo de la tesis.

## CAPÍTULO 2

### TRABAJO EXPERIMENTAL

---

#### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se describe el trabajo experimental realizado en operaciones de torneado de acabado a alta velocidad de superaleaciones de base níquel empleando herramientas PCBN. Como se ha indicado en el primer capítulo, uno de los principales objetivos de esta tesis es determinar experimentalmente el efecto de los parámetros de corte empleados en este tipo de mecanizados, así como verificar su viabilidad industrial. Para ello, se realizaron ensayos de desgaste con distintas herramientas comerciales PCBN adecuadas para estos procesos. También se realizaron ensayos con herramientas de metal duro, que son las empleadas actualmente en aplicaciones industriales, para poder valorar las ventajas y desventajas de las nuevas herramientas PCBN. Durante los ensayos se monitorizaron distintas magnitudes relacionadas con el desgaste de la herramienta y con la integridad superficial del material mecanizado, considerando que el control del daño debido al mecanizado es necesario en operaciones de acabado de componentes de elevada responsabilidad. Para la consecución de este objetivo se ensayó un amplio rango de parámetros y herramientas de corte, así como tres estrategias de refrigeración: mecanizado en seco, fluido de corte a presión convencional (7,5 bar) y fluido de corte a alta presión (70 bar).

## 2.2. Estado del arte en la investigación experimental de mecanizado de las superaleaciones con base níquel

En la actualidad la necesidad de mecanizar superaleaciones es una parte importante en la fabricación de numerosas piezas [19]. Se trata de materiales de baja maquinabilidad cuyo mecanizado presenta numerosos retos a pesar de los importantes avances realizados en los últimos años.

Los principales factores que afectan al mecanizado de las superaleaciones base níquel son:

- Mantienen elevadas propiedades mecánicas a altas temperaturas.
- Alta resistencia a impactos dinámicos.
- Son materiales abrasivos al corte debido a la presencia de carburos en su microestructura.
- Alto endurecimiento por deformación en el mecanizado.
- Se producen elevadas temperaturas en la zona de corte debido a su baja conductividad.
- Formación de viruta dura y tenaz durante el mecanizado que origina altos niveles de desgaste de herramienta.

El mecanizado de componentes de superaleaciones termorresistentes base níquel puede dividirse en tres fases diferentes:

- **Desbaste:** Generalmente el material procede de forja por lo que presenta una superficie rugosa y desigual y no se ha realizado sobre él ningún tratamiento térmico de endurecimiento. En estas operaciones se realizan pasadas con elevadas profundidades para obtener la forma básica del componente. En general se emplean herramientas de metal duro con recubrimiento. También es posible emplear herramientas cerámicas en casos en los que la pieza presente buenas condiciones de estabilidad de corte.
- **Mecanizado medio:** En general el material se encuentra en su última fase de tratamiento de endurecido por precipitación (tratamiento de envejecimiento térmico) y presenta durezas de entre 36 y 46 HRC. Se corresponde con el perfilado de la pieza con tolerancias moderadas. Generalmente se emplean herramientas de corte cerámicas que permiten elevadas velocidades de corte y por tanto elevadas productividades.
- **Acabado:** Esta etapa, en la que se centra esta tesis, presenta los requerimientos de calidad e integridad superficial más estrictos. Las herramientas empleadas deben presentarafilados agudos que permitan garantizar las mínimas deformaciones y tensiones residuales en la superficie mecanizada. Por ello, en general es preciso emplear herramientas de metal duro, puesto que materiales de

corte de mayor dureza presentan una mayor fragilidad que impide trabajar con los afilados requeridos.

El desarrollo de nuevos materiales de corte basados en nitruro de boro cúbico (CBN) con menor contenido de CBN y mayor tenacidad ha permitido desarrollar herramientas comerciales de tipo PCBN (nitruro de boro cúbico policristalino) con afilados suficientemente agudos como para ser aplicadas en el acabado de superaleaciones base níquel, permitiendo mantener la integridad superficial del componente, y empleando velocidades de corte muy superiores a las recomendadas para herramientas de metal duro.

A continuación, se describen los principales resultados de interés para esta tesis, obtenidos por distintos grupos de investigación en el ámbito experimental de los procesos de mecanizado de superaleaciones base níquel.

El desgaste observado en las herramientas de corte son el efecto combinado de los diferentes mecanismos de desgaste involucrados en la fricción por deslizamiento que ocurren en la interfaz de contacto entre la herramienta, la viruta y la superficie mecanizada [20]. Las superaleaciones de Ni contienen partículas de carburo altamente abrasivas que causan desgaste abrasivo. La baja conductividad térmica y el endurecimiento en el mecanizado causa una elevada temperatura en la interfaz, hasta 1200 °C, la alta temperatura favorece la oxidación y el desgaste por difusión. Además, la alta afinidad química entre la pieza y los materiales utilizados para las herramientas de corte aumenta los fenómenos de difusión [21]. La adhesión a la herramienta de corte se observa con frecuencia durante el mecanizado de aleaciones de Ni, esta puede generar daños en la superficie de desprendimiento de la herramienta [22].

La adhesión y el endurecimiento por deformación de estos materiales en el mecanizado están relacionados con las entallas severas en la punta de la herramienta y la intersección entre el filo de corte y la superficie mecanizada, siendo un modo de fallo crítico muy frecuente, especialmente cuando se emplean herramientas de carburo cementado. El endurecimiento de la superficie mecanizada también puede generar rebabas que pueden causar una rotura del filo catastrófica [23]. Otro tipo de desgaste que puede ser dominante en estos mecanizados es el desgaste de flanco en la superficie de incidencia debido a la abrasión producida por las partículas de carburo presentes en estas aleaciones y el astillamiento debido a las elevadas fuerzas de mecanizado concentradas en el filo.

M. Anthony Xavier et al. [24] estudiaron el desgaste de herramientas de diferentes materiales (carburo con recubrimiento TiAlN, cerámico y CBN) en torneado de Inconel 718. Los ensayos se realizaron en condiciones de seco, fluido de corte a presión convencional y con refrigerante MQL Para velocidades de 60-120 m/min donde los mayores niveles de desgaste se observaron en las herramientas CBN. Además, se puede observar que en los ensayos con fluido de corte tuvo un mayor desgaste de flanco, mientras que los ensayos en condiciones de seco y MQL no mostraron grandes diferencias.

## 2.2 Estado del arte en la investigación experimental de mecanizado de las superaleaciones con base níquel

Otros autores compararon el comportamiento de herramientas cerámicas y herramientas PCBN por ser las que permiten alcanzar mayores velocidades de corte (entre 250 y 300 m/min). Los resultados mostraron que las herramientas PCBN producían mejores acabados superficiales y menores niveles de fuerza de mecanizado. Además se observó un elevado desgaste por difusión de las herramientas cerámicas [25]. J. Zhou et al.[26] analizaron la microestructura y las tensiones residuales al mecanizar con estos dos tipos de herramientas con fluido de corte a presión convencional (5 bar). Tanto la herramienta PCBN como la cerámica produjeron un refinamiento de los granos para las velocidades de corte ensayadas (200 m/min y 350 m/min). La capa de debajo de la superficie mecanizada se caracterizaba por granos distorsionados y dislocaciones de bandas. La herramienta PCBN produjo una zona de deformación más profunda debido a su mayor radio del filo. Las herramientas PCBN producían tensiones residuales de compresión mientras que las herramientas cerámicas producían una mayor tensión residual de tracción, que suponen un mayor riesgo de fallo en servicio del componente.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los procesos, tipo de herramienta, parámetros de corte y principales resultados de algunas investigaciones destacadas en mecanizado de Inconel 718.

**Tabla 3.** Resumen de trabajos de investigación relevantes en procesos de mecanizado de Inconel 718

Operación [Referencia bibliográfica]	Herramienta	Parámetros de corte	Comentarios
Fresado [27]	Carburo con recubrimiento AlTiN	Refrigerante presión convencional Vc = 20 m/min a = 0.03 mm/diente ap = 5 mm; ae = 16 mm	Comparación de fresado convencional con fresado superabrasivo (SAM). Mejores resultados para fresado SAM. Para operaciones de acabado se observó una reducción entre el 15-20%. Fresado SAM presentó una mejorar en la calidad con una reducción en la rugosidad entre el 28-45 %
	Carburo con recubrimiento TiN/TiAlN	Refrigerante presión convencional Vc = 20 m/min a = 0.03 mm/diente ap = 20 mm; ae = 0.2 mm	
	Herramienta PCBN de molienda	Refrigerante presión convencional Vc = 900 m/min a = 0.03 mm/diente ap = 20 mm; ae = 0.2 mm	
Fresado [28]	Fresa de metal duro	Refrigerante a alta presión V = 11-140 m/min a = 0.04-0,15 mm/diente	Desgaste de flanco y entalla. Velocidades superiores a 50 m/min producían un desgaste rápido debido al endurecimiento. A mayor avance se producían mayores roturas frágiles del filo.
Torneado [29]	Herramienta cerámica Al2O3 + SiC	Sin refrigerante Vc = 250-300 m/min a = 0.05-0.2 mm/rev p = 0.05-0.2 mm	Desgaste de flanco. Alta dependencia de las fuerzas de corte con avance, profundidad y desgaste
Torneado [4]	Herramienta de carburo cementado	Refrigerante a 6 y 80 bar Vc = 30 m/min a = 0.1 mm/rev p = 2 mm	Para ambas presiones de fluido de corte se encontró desgaste de flanco y entalla. Fluido de corte a alta presión produjo una reducción del desgaste de flanco, sin embargo, no se observaron cambios en el desgaste de entalla.
Torneado [25], [30]	Herramienta PCBN con recubrimiento (TiN) y sin recubrimiento	Refrigerante a 6 bar Vc = 250,300, 350 m/min a = 0,1, 0,15, 0,2 mm/rev p = 0.3 mm	No se observó efecto del recubrimiento. Desgastes de cráter, flanco, adhesión y fracturas.
Torneado [31]	Herramientas CBN con varios aglutinantes	Refrigerante presión convencional Vc = 200-450 m/min a = 0.2 mm/rev p = 0.3-0.5 mm	Desgaste de flanco, entalla, y rotura del filo. El aglutinante cerámico con granos más pequeños (1 µm) obtuvo los mejores resultados.
Torneado [32]	Herramientas de carburo recubiertas (TiAlN/TiN)	Refrigerante presión convencional y seco Vc = 50-70 m/min a = 0.1 mm/rev p = 0.5 mm	Desgaste de flanco, entalla y astillamiento. La viabilidad del mecanizado en seco se ha demostrado. Fluido de corte aumento la vida entre 5 y 15 minutos.
Torneado [33]	Herramientas de carburo con varios recubrimientos (TiCN-Al2O3 - TiN; TiAlN; TiAlSiCrN)	Refrigerante Vc = 70 m/min a = 0.21-0.26 mm/rev p = 0.2 mm	Desgaste dominante: flanco. Al eliminarse el recubrimiento aparece desgaste de cráter y adhesión. Recubrimiento TiAlN de espesor 3.5 mm presentó los mejores resultados. Al desaparecer el recubrimiento las herramientas de carburo con granos más pequeños presentaron mejores resultados

### **2.2.1. Mecanizado de supraleaciones de base níquel con herramientas de carburo**

El principal problema de estas herramientas es la insuficiente estabilidad termoquímica en la superficie de contacto entre el material mecanizado y la herramienta que provoca un desgaste excesivo especialmente a velocidades de corte superiores de 30 m/min [34], [35]. A elevadas velocidades se alcanzan temperaturas en la herramienta superiores a los 1000 °C que provocan una pérdida de propiedades mecánicas del material de corte y se relacionan con desgastes principalmente de cráter, de deformación y de entalla. En algunos casos también el desgaste de flanco puede ser dominante. En general las herramientas con recubrimiento presentan vidas algo superiores a las de metal duro sin recubrimiento [36] y permiten emplear velocidades de corte superiores [37]. Esto se debe principalmente a las propiedades de los recubrimientos que dan un menor coeficiente de fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo reduciendo la temperatura en la zona de corte [38].

En el trabajo de M. Rahman et al. [39] se consideraron herramientas de carburo con tres ángulos de posición del filo principal (-5°, 15 y 45°) y dos tipos de recubrimiento (TiN PVD y TiN CVD). Se realizaron ensayos con avances 0,2, 0,3 y 0,4 mm/rev, velocidades de corte de 30, 40 y 50 m/min y profundidad 2 mm. La herramienta con ángulo de 45° presentó una vida considerablemente superior. También se observó que el desgaste predominante en la herramienta con el recubrimiento realizado con deposición química de vapor (CVD) fue el desgaste de entalla. Sin embargo, para la herramienta con recubrimiento por deposición física de vapor (PVD) se observó que el desgaste principal fue desgaste de flanco. Recubrimientos como TiAlN mejoran las propiedades de la herramienta dándole una mayor dureza y resistencia a la oxidación [37].

Los recubrimientos TiN, TiAlN han sido estudiados ampliamente para diferentes combinaciones con diferentes compuestos y capas de recubrimiento. S.C. Veldhuis et al. [40] estudiaron el efecto tribológico de aplicar PVD en distintos recubrimientos de las herramientas (TiAlCrN, TiAlCrN/WN). Los resultados mostraron que este método de aplicación de recubrimiento redujo el coeficiente de fricción en los procesos de mecanizado con lo que disminuyó la generación de calor en la interfaz de la herramienta. Otros autores investigaron el comportamiento de herramientas con recubrimiento PVD en torneado mostrando que el desgaste por adhesión no se ve mejorado con este tipo de recubrimientos [41].

J. Yi et al. [42] estudiaron el efecto del contenido de níquel en el mecanizado con herramientas de metal duro con recubrimientos monocapa AlTiN-Ni con un contenido variable de níquel entre 0 y 3 %. Se observó que el aumento del contenido en níquel redujo la dureza del recubrimiento, pero mejoró la tenacidad y la resistencia a la adhesión, lo cual supuso un aumento de la capacidad de mecanizar a mayor velocidad de corte.



En [43] se muestran ensayos realizados con herramientas con un nuevo recubrimiento nanocompuesto multicapa  $\text{Ti}_{25}\text{Al}_{65}\text{Cr}_{10}\text{N}/\text{Ti}_{20}\text{Al}_{52}\text{Cr}_{22}\text{Si}_8\text{N}$  desarrollado por el grupo investigador y con recubrimiento convencional AlTiN observándose principalmente desgaste por adhesión y abrasión. Las herramientas con recubrimiento nanocompuesto multicapa redujeron notablemente ambos tipos de desgaste, así como el astillamiento del filo.

G. Rajkumar et al. [44] analizaron el efecto de mecanizar Inconel 718 con herramientas de carburo y titanio. Los resultados mostraron que para bajas velocidades de corte se observó un mejor comportamiento para las herramientas de titanio. Sin embargo, para velocidades más altas se observó un mejor comportamiento en las de carburo.

### **2.2.2. Aplicación de herramientas PCBN al mecanizado de aceros endurecidos y de superaleaciones de base níquel**

Las herramientas CBN tienen una resistencia a elevada temperatura superior a la de los metales duros por lo que permiten emplear velocidades de corte significativamente mayores. El nitruro de boro cúbico (CBN) es uno de los materiales conocidos más duros, solo superado por la dureza del diamante. Por otra parte, el CBN presenta mayor resistencia química y resistencia a elevada temperatura.

En general, las herramientas para PCBN son una elección adecuada cuando se trata de mecanizar materiales muy duros (de dureza mayor de 50 HRC), ofreciendo un alto rendimiento en términos de buen acabado superficial y una alta eficiencia de fabricación con respecto a los procesos de rectificado [45], [46]. También son una alternativa adecuada para distintos procesos de mecanizado en seco [47].

Las herramientas de nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) pueden dividirse en dos grupos: de bajo contenido de CBN (40%-70%) y de alto contenido de CBN (80-95%). El desarrollo de una nueva generación de herramientas PCBN con bajo contenido de CBN ha permitido combinar una dureza elevada con una tenacidad superior a la de otras herramientas de este tipo. Esto permite emplear filos de corte con afilados más agudos, adecuados para operaciones de acabado de materiales de elevada dureza con altas velocidades de corte [48].

O. Gutnichenko et al. [49], [50] evaluaron la formación de una capa de protección de herramientas (TPL: *Tool Protection Layer*) en la interfaz de la herramienta para diferentes composiciones de HCWCI (*High Chromium White Cast Irons*) debido a su elevada dureza y resistencia a la abrasión. El aumento del porcentaje de contenido de silicio provocó una reducción de las fuerzas debido a la presencia de una TPL más estable. Ling Chen et al. [47] analizaron los mecanismos de desgaste en el mecanizado en seco de HCWCI con herramientas PCBN, siendo el desgaste abrasivo el mecanismo dominante que da lugar a la progresión del desgaste de flanco.

D. Boing et al. [51] se centraron en análisis del mecanizado de diferentes aceros endurecidos (en un rango de durezas de 35-60HRC) con herramientas PCBN. Los niveles de desgaste más bajos se encontraron para el mecanizado de acero de dureza

## 2.2 Estado del arte en la investigación experimental de mecanizado de las superaleaciones con base níquel

50HRC. El principal mecanismo de desgaste fue la abrasión debido a la gran cantidad de carburos presentes en la pieza mecanizada. Los tipos de desgaste dominante observados fueron principalmente en forma de desgaste de flanco y desgaste de cráter [52]. Otros estudios similares de mecanizado de aceros endurecidos [53], [54] encontraron los mismos tipos de desgaste. W.Y.H. Liew et al. [55] investigaron el desgaste de las herramientas PCBN en el mecanizado de alta precisión de aceros endurecidos a bajas velocidades de corte y demostraron la importancia de aumentar el contenido del aglutinante de las herramientas y disminuir el tamaño de grano para mejorar la resistencia a la fractura de las herramientas PCBN.

C. Lahiff et al. [48] analizaron la progresión del desgaste en acabado de aceros endurecidos con herramientas PCBN. Los principales tipos de desgaste encontrado fueron desgaste de flanco y desgaste de cráter originados por diferentes mecanismos como: abrasión, adhesión, difusión y desgaste químico. El desgaste de flanco está relacionado directamente con la precisión de las piezas mecanizadas además de usarse como criterio de vida de las herramientas PCBN.

En relación con la aplicación de herramientas PCBN al acabado de superaleaciones base níquel, H. Tanaka et al. [56] estudiaron la influencia del contenido de CBN en el mecanizado de Inconel 718. Un bajo contenido de CBN con un aglutinante TiN presentó una elevada resistencia al desgaste de las herramientas de corte para mecanizados a alta velocidad (300 m/min). Además, la vida de la herramienta dependía significativamente de la velocidad de corte seleccionada.

J.P. Costes et al. [31] analizaron la influencia del contenido de CBN en herramientas PCBN en el mecanizado de Inconel 718 a alta velocidad (250 m/min y 300 m/min). Los resultados experimentales mostraron que las herramientas PCBN con contenido medio entre el 45 % y 60 % y grano pequeño presentan mayor resistencia al desgaste y mejor tenacidad.

V. Bushlya et al. [30] analizaron el torneado de Inconel 718 con herramientas PCBN con y sin recubrimiento. Se observó que a altas velocidades de corte (300 m/min) el recubrimiento no supuso ningún beneficio en términos de vida de herramientas. El análisis del desgaste determinó que los principales mecanismos presentes fueron abrasión y químico. En [57] analizó las interacciones químicas y por difusión entre herramientas PCBN con y sin aglutinante TiC y el Inconel 718. Se observó que el aglutinante TiC reducía la degradación de las propiedades al ser menos susceptible a la interacción con cromo, niobio o molibdeno del Inconel 718.

B. Breidenstein et al. [36], [58] y B. Deken et al. [59] estudiaron el efecto de preparar los filos de corte mediante mecanizado láser de las herramientas PCBN. El mecanizado con láser de esta superficie formó en la superficie nitruro de boro hexagonal (HBN). Se observó que esta capa podía actuar como un lubricante sólido que reduce las fuerzas de corte. Se puede lograr una vida alta de la herramienta mediante una suficiente capa HBN para mejorar la lubricación sin afectar a la estabilidad debido a una menor dureza.

No se ha encontrado información sobre estudios relativos al efecto de la geometría del filo de corte en procesos de mecanizado de Inconel 718 con herramientas PCBN. Determinar estos efectos es uno de los objetivos y aportaciones de esta tesis.

### **2.2.3. Efecto del fluido de corte en mecanizado de superaleaciones base níquel**

Debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan en el mecanizado de superaleaciones de base níquel, el uso de diferentes tipos de fluidos de corte y cómo se aplican es crítico para el desgaste de la herramienta. Entre otros tipos de desgaste, el fluido de corte previene el desgaste de la herramienta por adhesión, y por tanto, mejora el acabado superficial [60].

E.O. Ezugwu et al.[61], [62] encontraron que el uso de otras técnicas de refrigeración como la utilización de fluido de corte a alta presión al mecanizar Inconel 718 con herramientas de carburo puede reducir la rugosidad superficial. Esto se debe a la mayor penetración del fluido de corte en la interfaz entre herramienta y material mecanizado lo cual reduce la fricción entre ambas y por consiguiente reduce el desgaste y mejora el acabado superficial. También se ha de tener en cuenta el riesgo de que se produzca el efecto contrario en ciertas condiciones, ya que al aumentar la presión de refrigeración puede originarse demasiado enfriamiento en la zona de corte que produce viruta frágil y endurecida que podría afectar a la calidad superficial. Otro efecto de la refrigeración a alta presión es la reducción de la longitud de contacto viruta-herramienta por lo que se incrementan las presiones de corte en la zona más cercana a la arista de corte. Esto puede provocar un fallo prematuro de la herramienta por astillamiento o entalla, especialmente en el caso de herramientas frágiles como las cerámicas, acelerado por las grandes fluctuaciones térmicas [6].

La presión con la que se introduce el fluido de corte también afecta a la morfología de la viruta. En general, en mecanizado de superaleaciones base níquel con presión convencional se produce una viruta larga y tubular durante el mecanizado. A medida que se aumenta la presión se producen virutas más segmentadas y de menor tamaño.

K. Sørby et al. [63] analizaron el efecto de la introducción de fluido de corte mayor presión (20 bar) para mecanizar Inconel 625 con herramientas cerámicas. No se observaron grandes cambios en el tipo de desgaste ni en la vida de herramienta, pero se observó una mayor segmentación de la viruta de corte, evitando tener virutas de longitudes demasiado largas que pudieran poner en peligro el proceso.

En el estudio de T. Cayli et al. [63] sobre refrigeración a alta presión en mecanizado de aleaciones de titanio y superaleaciones de níquel, se observó una reducción del desgaste de flanco considerable. Sin embargo, no se obtuvieron resultados concluyentes sobre la influencia sobre el acabado de la superficie mecanizada.

Z. Vagnorius et al. [64] concluyeron que la introducción de líquido a alta presión en mecanizado con herramientas de metal duro era beneficiosa para la vida de herramienta. En mecanizado con herramientas cerámicas la refrigeración a alta presión producía una

## 2.2 Estado del arte en la investigación experimental de mecanizado de las superaleaciones con base níquel

reducción del desgaste de flanco y un aumento del desgaste por entalla que no afectaba a la vida de la herramienta.

A. Suarez et al. [32] compararon el efecto de la refrigeración a presión convencional y a alta presión con herramientas de carburo en Inconel 718. Los resultados mostraron una reducción del desgaste de flanco del 30% y una reducción de las fuerzas de mecanizado mayor al 10%. En los ensayos con fluido a alta presión el desgaste predominante fue el desgaste de entalla. R. polvorosa et al. [4] analizó el desgaste y fuerzas de corte para dos aleaciones de níquel (Inconel 718 y Waspaloy) con presión convencional y alta presión (80 bar). Para ambas aleaciones se encontró un desgaste similar, aunque se observó mayor adhesión para el Waspaloy. El fluido de corte a alta presión mejoro el comportamiento con una reducción del desgaste.

Z. Fang et al. [65] analizaron el efecto de un nuevo concepto de plaquitas introduciendo por un canal dentro de la plaquita un fluido a alta presión para reducir las temperaturas. Los resultados mostraron un menor desgaste de flanco y adhesión. Sin embargo, los parámetros de corte estaban limitados por la posición del canal del fluido. D. Cica et al. [66] investigaron como afectaba distintos parámetros de la introducción del fluido corte a alta presión en el mecanizado con el objetivo de optimizar el proceso. Se variaron diámetros, velocidades y presiones del inyector de fluido de corte. Los resultados indicaron que el diámetro, presión y avance eran los parámetros más críticos que afectaban a la temperatura en la zona de corte y con ello al desgaste de la herramienta y a la integridad y calidad del componente.

Por otra parte, debido al impacto medioambiental y de salud laboral del fluido de corte y al coste asociado al uso del mismo existen numerosas investigaciones centradas en otras técnicas alternativas. Por ejemplo, la utilización de *minimum quantity lubrication* (MQL) en mecanizado de Inconel 718 [6]. En general, los mejores resultados se han obtenido mediante la eliminación de los fluidos de corte (mecanizado en seco) [67], aunque es necesario considerar el mayor desgaste de herramienta y la peor calidad superficial obtenida. Para compensar el efecto de la eliminación del fluido de corte se han desarrollado nuevas herramientas adaptadas a estas condiciones. Una de las alternativas es emplear materiales de corte avanzados como el nitruro de boro cúbico (CBN) o el nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) [68].

En mecanizado en seco, los efectos térmicos suelen ser determinantes. El aumento de la velocidad de corte produce mayores temperaturas que perjudican a las propiedades mecánicas tanto del material mecanizado como de la herramienta. Por ello, en general se reducen las fuerzas de corte y se aceleran los mecanismos de desgaste de la herramienta. Además, las altas temperaturas en la zona de corte producen mayor adhesión y mayor reactividad química que acelera el desgaste por difusión.

El estudio de mecanizado en seco de superaleaciones ha sido analizado por varios autores. Ginting and Nouari [69] investigaron el fresado en seco de aleaciones de titanio con herramientas de carburo sin recubrimiento. El desgaste principal fue desgaste de flanco, además de producirse roturas frágiles del filo. Las herramientas PCD y PCBN superan a las herramientas de carburo en el mecanizado en seco de aleaciones de titanio.

Esto se atribuye principalmente a la reacción química del carbono de la herramienta con el titanio formando una capa TiC que protege de abrasión y reduce la difusión [70].

A pesar de las agresivas condiciones que se producen durante el mecanizado de superaleaciones de níquel, el mecanizado en seco presenta un elevado interés por razones económicas y ecológicas. El coste asociado al refrigerante (adquisición, uso, eliminación y limpieza de piezas) es significativo, suponiendo hasta cuatro veces más que el coste de las herramientas de corte [71].

Existen diversas investigaciones centradas en los procesos de mecanizado en seco de Inconel 718. Debido a las elevadas temperaturas en la zona de corte, frecuentemente el principal mecanismo de desgaste es la adhesión [72]. J.L. Cantero et al. [32] analizaron el desgaste de las herramientas de carburo con recubrimiento multicapa (TiAl/TiAlN) en el mecanizado de Inconel 718 en operaciones de acabado con y sin taladrina. La eliminación del fluido de corte produjo una reducción significativa de la vida de herramienta, pero para determinadas condiciones se mantenía en valores adecuados para su aplicación en procesos industriales. Además, se consideraron dos ángulos de posición del filo principal ( $0^\circ$  y  $45^\circ$ ) observándose que el aumento del ángulo reducía el desgaste de la herramienta debido al menor espesor de viruta y por tanto una menor presión sobre el filo, que reducía el desgaste por astillamiento. La rugosidad superficial se mantuvo prácticamente constante durante el mecanizado y en un rango de valores aceptable, aunque ligeramente superior y más dispersos en mecanizado sin refrigerante.

A. Devillez et al. [73] estudiaron el efecto del mecanizado en seco sobre la integridad de la superficie. Las pruebas de torneado con fluido y en seco se realizaron a varias velocidades de corte, con condiciones de semiacabado (0,5 mm de profundidad de corte y 0.1 mm/rev velocidad de avance) y utilizando una herramienta de carburo recubierto. Se concluyó que el valor óptimo de velocidad de corte para el mecanizado en seco era 60 m/min. Se obtuvo una calidad de superficie aceptable, con tensiones residuales y valores de microdureza en la zona afectada del mismo orden que los obtenidos con fluido de corte. Tampoco se observó una alteración grave de la microestructura superficial en los ensayos en seco. La tendencia a formar recrecimiento de filo por adhesión se redujo al emplear taladrina debido a las menores temperaturas en las superficies de la herramienta.

No se ha encontrado información sobre estudios que aborden el mecanizado de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN sin usar refrigerante. Por ello, uno de los objetivos de esta tesis es analizar la viabilidad de la eliminación del fluido de corte en este tipo de procesos. Los resultados se compararán con los obtenidos en mecanizado con herramientas de carburo de viabilidad comprobada. Para ello se evaluarán el comportamiento de las herramientas midiendo y analizando fuerzas de mecanizado, rugosidad, desgaste y vida de herramienta.

### 2.3. Descripción de los ensayos de mecanizado realizados

Una vez enmarcado el trabajo experimental realizado en esta tesis mediante el Estado del Arte desarrollado en el anterior punto, se describen a continuación los materiales, equipos empleados y metodología empleados.

#### 2.3.1. Material y herramienta de corte

Los ensayos de torneado de Inconel 718 se realizaron a partir de formatos cilíndricos de 100 mm de diámetro y 130 mm de longitud, endurecidos mediante un tratamiento de solución y envejecimiento, que se corresponde con una dureza homogénea en el material de 44-45,5 HRc. Estas características son las que presenta el material en las operaciones de acabado industriales. En la Tabla 4 se muestra la composición química de la aleación Inconel 718 donde es destacable el alto contenido en hierro de este material.

*Tabla 4. Composición química del Inconel 718.*

<i>Elemento (%)</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Co</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>C</i>
<i>Inconel 718</i>	53,02	18,49	18,12	5,40	3,06	0,96	0,55	0,10	0,06	0,05	0,06	0,03

En relación con las herramientas de corte seleccionadas, en primer lugar, se ensayaron herramientas de carburo correspondientes a la designación TS2000 de fabricante Seco. Se trata de herramientas recomendadas para el acabado de Inconel 718 que se consideraron para disponer de una referencia de los resultados obtenidos en condiciones de mecanizado convencionales.

Con el objetivo de determinar el comportamiento de las herramientas PCBN en este tipo de operaciones en cuanto a integridad superficial y productividad se ensayaron cuatro herramientas comerciales de este tipo recomendadas por distintos fabricantes.

En la Tabla 5 se muestra el radio de punta, preparación de filo, fabricante, composición y recubrimiento de cada herramienta.

**Tabla 5.** Características de las herramientas de corte ensayadas.

Tipo de material de corte	Designación del material	Fabricante	Radio punta (mm)	Preparación del filo	Composición	Recubrimiento
<b>Carburo</b>	TS2000	Seco	0,4	Redondeo: radio 25 $\mu\text{m}$	Substrato carburo	Recubrimiento TiAlN + TiN
<b>PCBN</b>	E25 LI U CBN170	Seco	0,8	Redondeo: radio 35 $\mu\text{m}$	65% CBN, aglutinante cerámico	Sin recubrimiento
	EA 7015	Sandvik	0,8	Elíptico (radio menor 15 $\mu\text{m}$ radio mayor 25 $\mu\text{m}$ )	50% CBN, aglutinante cerámico	Recubrimiento TiN
	FN2 MB8025	Mitsubishi	0,8	Achaflanado: Profundidad: 50 $\mu\text{m}$ Ángulo: -15°	60% CBN, aglutinante cerámico	Sin recubrimiento
	EMT KB5625	Kennametal	0,8	Redondeo: radio 25 $\mu\text{m}$	Contenido medio CBN, aglutinante cerámico	Recubrimiento TiAlN

Se puede observar que todas las herramientas PCBN tienen un radio de punta de 0,8 mm mientras que la de metal duro es de 0,4 mm. Esto es debido a que se pretende obtener resultados de aplicación industrial por lo que se han considerado radios de punta recomendados para dichos tipos de herramientas. Debido a la mayor fragilidad de las herramientas PCBN es preciso incrementar el radio de punta para obtener mejores resultados.

Asimismo, la preparación del filo de corte, material del substrato y recubrimiento de las distintas herramientas es diferente por ser las características de las herramientas recomendadas por los distintos fabricantes considerados. Este criterio de selección de herramientas dificulta el análisis comparativo de los resultados debido a que cambian varias magnitudes simultáneamente, pero se ha considerado el más interesante en cuanto a la aplicabilidad industrial y relevancia de los resultados obtenidos.

En concreto se ensayaron afilados con facetas o redondeados con diferentes dimensiones (detalle en Tabla 5). Todas las herramientas PCBN tienen un bajo contenido de CBN, de en torno al 50% a 60%, que son las composiciones recomendadas en la bibliografía para operaciones de acabado de Inconel 718 [48].

En relación con la geometría de filo, ángulo de punta y orientación, las herramientas de carburo empleadas fueron plaquitas positivas con el código CCMT 09T304F1, montadas en un portaherramientas SCLCR 2525M09JET. Para los ensayos con herramientas PCBN se usaron plaquitas negativas con el código CNGA120408 montadas en un portaherramientas PCLNR2525M12. Estas designaciones se corresponden ángulo de punta de 80° y ángulo de posición del filo principal 5° para todas las herramientas (tanto la de metal duro y como las PCBN). La herramienta de metal duro ensayada presenta un ángulo de incidencia de 7° y con un ángulo de desprendimiento e inclinación de 17°. Las herramientas PCBN se corresponden con una

## 2.3 Descripción de los ensayos de mecanizado realizados

geometría más robusta con ángulo de incidencia de  $6^\circ$  y ángulo de desprendimiento de  $-6^\circ$ .

### 2.3.2. Metodología y equipos experimentales.

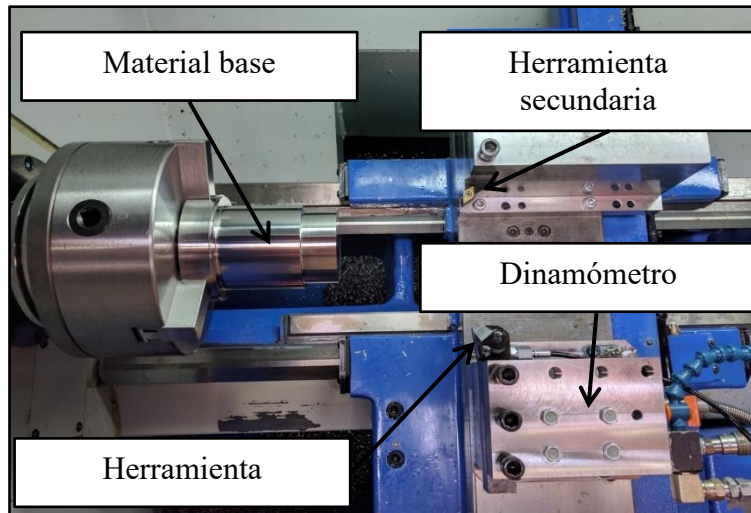
Los ensayos se llevaron a cabo en un torno de control numérico Pinacho Smart 6/165. Para poder realizar ensayos de mecanizado con fluido de corte a alta presión y a presión convencional controlada se introdujo de manera externa el refrigerante a través de un sistema de alta presión “Smart Cooling System”. En la Figura 13 se puede observar tanto el torno CNC como el sistema de alta presión. Los ensayos se realizaron con un refrigerante Rhenus FU50T soluble en agua con un porcentaje de mezcla del 6 %. Para tener un mayor control de las condiciones de refrigeración y lubricación en los ensayos se empleó un portaplaquitas con refrigeración interior que dirige de forma optimizada y repetitiva el fluido a la zona de corte (*Duo Jetstream Tooling* de *Seco Tools*). Este sistema dispone de dos salidas del fluido, una orientada hacia la zona de contacto herramienta-viruta en la superficie de desprendimiento y otra dirigida hacia la zona de la superficie de incidencia más cercana al filo. El flujo de la superficie de desprendimiento busca mejorar el comportamiento tribológico y favorecer la rotura de la viruta, el fluido dirigido hacia la superficie de incidencia busca mejorar la refrigeración de la herramienta y de la superficie mecanizada.



**Figura 13.** Torno Pinacho Smart 6/165 y sistema de alta presión Smart Cooling System

Los ensayos consistieron en la realización de pasadas de cilindrado de entre 10 y 15 segundos de duración, para lo cual se definieron longitudes de corte función de las velocidades de corte, avance y del diámetro del formato empleado. En la Figura 14 se puede observar la herramienta y la pieza de trabajo en el montaje.



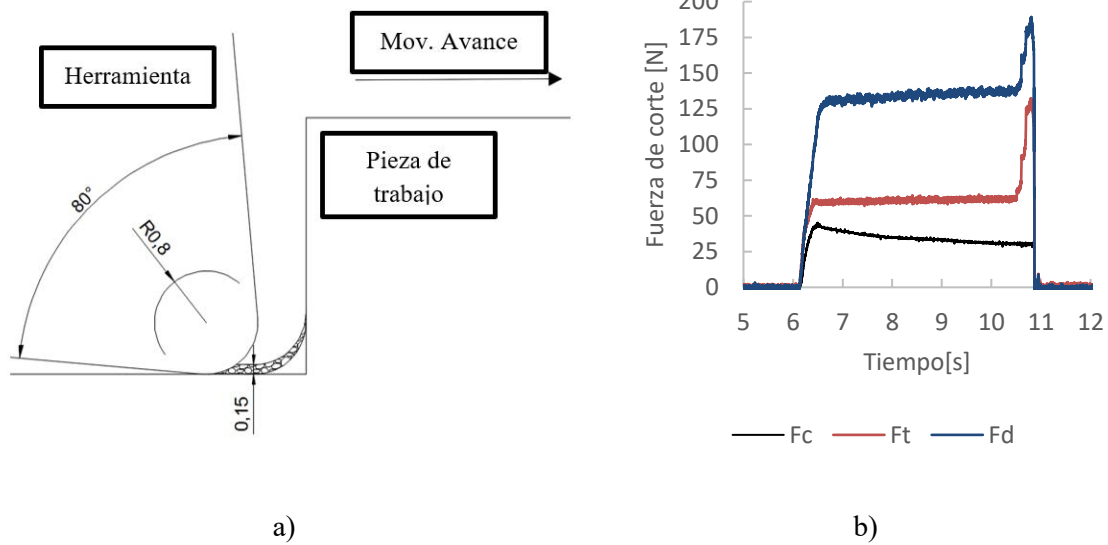


**Figura 14.** Disposición experimental de la instrumentación usada para los ensayos de mecanizado.

Como se observa en la figura anterior, además de la herramienta ensayada, que se fijó sobre un dinamómetro para la medida de fuerzas de mecanizado, se dispuso de una herramienta secundaria situada en el carro posterior del torno. Dicha herramienta secundaria eliminaba una pequeña cantidad de material en la zona final de cada pasada de cilindrado, para evitar que en la parte final de la siguiente pasada de ensayo, se produjera un incremento brusco de la sección de viruta debido al redondeo generado en el material por el radio de punta de la herramienta. Tal y como se observa en la Figura 15a, dicho incremento de sección es significativo en estos ensayos debido a que la profundidad de pasada es muy pequeña en relación con el radio de punta y provoca un brusco incremento de las fuerzas de mecanizado, que podría provocar roturas frágiles del filo (Figura 15b).

Otros autores han resuelto este problema empleando otras metodologías como reducir progresivamente la longitud de las pasadas de cilindrado, lo que conlleva a una pérdida considerable de material, o emplear como formato de partida tubos o discos de material eliminando en una única pasada todo el espesor del mismo.

## 2.3 Descripción de los ensayos de mecanizado realizados



**Figura 15.** a) Incremento de la sección de viruta no deformada en la parte final de una pasada de cilindrado. b) Evolución de las fuerzas de mecanizado durante una pasada de cilindrado realizada sin emplear herramienta secundaria (se observa el incremento de fuerzas final).

La medida de las componentes de la fuerza de mecanizado se realizó empleando una plataforma dinamométrica Kistler 9257B (Figura 16) sobre la que se fijó la herramienta ensayada (Figura 14). Este dinamómetro presenta una elevada rigidez y frecuencia natural que le confiere una excelente sensibilidad frente a pequeños cambios dinámicos en las fuerzas y una elevada precisión. Los datos técnicos más relevantes se pueden ver en la ficha de datos [74].



**Figura 16.** Dinamómetro Kistler 9257B

La transformación y amplificación de las señales correspondientes a las componentes de la fuerza de corte se realizó mediante un amplificador de carga (Kistler 5070). Para el procesamiento de la señal se usó una tarjeta de adquisición (NI USB-6361) controlada mediante un programa elaborado en LABVIEW que permite adquirir los datos de fuerza. La frecuencia de muestreo de adquisición se fijó en 1000 Hz.

El análisis de la evolución del desgaste de las herramientas de corte se realizó mediante microscopía óptica y electrónica. Para ello, se empleó un microscopio óptico Optika mod. SZR para la toma de imágenes de las distintas superficies de la herramienta y cuantificación de los tipos de desgaste observados en distintos instantes de los ensayos.

Para profundizar en el conocimiento de los desgastes producidos se obtuvieron imágenes complementarias con ampliaciones muy superiores e información de composición de los materiales observados mediante un microscopio electrónico (SEM) Philips XL-30 con un sistema de análisis EDSDX4i.

El final de vida de herramienta, en base a los desgastes encontrados en las herramientas, se estableció en una amplitud máxima de desgaste de entalla o desgaste de flanco de 0,4 mm. En algunos casos el fin de vida se alcanzó como consecuencia de la rotura catastrófica del filo de corte.

En relación con la integridad superficial obtenida se determinó periódicamente la rugosidad de la superficie mecanizada mediante un rugosímetro Mitutoyo Serie 178, modelo SJ-201. La metodología de medida se definió en base a la norma ISO 4287 realizándose, para obtener cada medida de rugosidad media aritmética (Ra), 5 tramos de 0,8 mm. Asimismo, para obtener medidas más representativas del acabado superficial, en cada caso se realizaron 5 medidas en distintas áreas del cilindro mecanizado tomándose como valor de la medida el máximo de los obtenidos.

A continuación, se describirán las condiciones de mecanizado consideradas y se analizarán los resultados experimentales obtenidos en relación con las fuerzas de mecanizado, desgaste y vida de herramienta y rugosidad superficial. Esta información se ha agrupado en función de las condiciones de refrigeración utilizadas. En primer lugar, ensayos realizados sin fluido de corte (mecanizado en seco) con herramientas PCBN y de metal duro. El segundo grupo de ensayos se corresponde con mecanizado con fluido de corte a presión convencional y también se ensayaron herramientas PCBN y de carburo para analizar la viabilidad y comparar los resultados con los ensayos sin fluido de corte. Por último, los ensayos con fluido de corte a alta presión, realizados únicamente con herramientas PCBN del fabricante de Seco (CBN170) pero en un rango más amplio de parámetros de corte.

## **2.4. Ensayos en seco**

De forma general se recomienda mecanizar Inconel 718 empleando abundante refrigeración para incrementar la duración de la herramienta y mejorar el control del daño en la superficie mecanizada. No obstante, como se indicó en el apartado 2.2.3 de este documento, el mecanizado en seco de superaleaciones presenta un elevado interés por el ahorro económico que puede suponer y por la disminución del impacto ambiental.

### **2.4.1. Condiciones de corte**

Además de considerar 4 herramientas comerciales distintas de tipo PCBN, se realizaron ensayos de mecanizado en seco con herramientas de metal duro (carburo). En estudios anteriores [75] se ha observado que las herramientas de carburo presentan un buen comportamiento en operaciones de acabado de Inconel 718 sin fluido de corte por lo

## 2.4 Ensayos en seco

que constituyen una referencia interesante para valorar la viabilidad de aplicar herramientas PCBN en este tipo de procesos.

En la Tabla 6 se pueden observar los valores de parámetros de corte ensayados para las distintas herramientas. La herramienta PCBN del fabricante Seco se probó con una mayor cantidad de condiciones de mecanizado por ser la única herramienta PCBN diseñada específicamente para operaciones de acabado de Inconel 718. Los valores de parámetros de corte ensayados se definieron en base a las recomendaciones de Seco. Cabe destacar que las herramientas PCBN permiten emplear velocidades de corte hasta 8 veces superiores a las herramientas de metal duro. En total, se realizaron 17 ensayos correspondientes a 5 herramientas distintas.

**Tabla 6.** Condiciones de corte establecida para los tres grupos de ensayos en condiciones de seco.

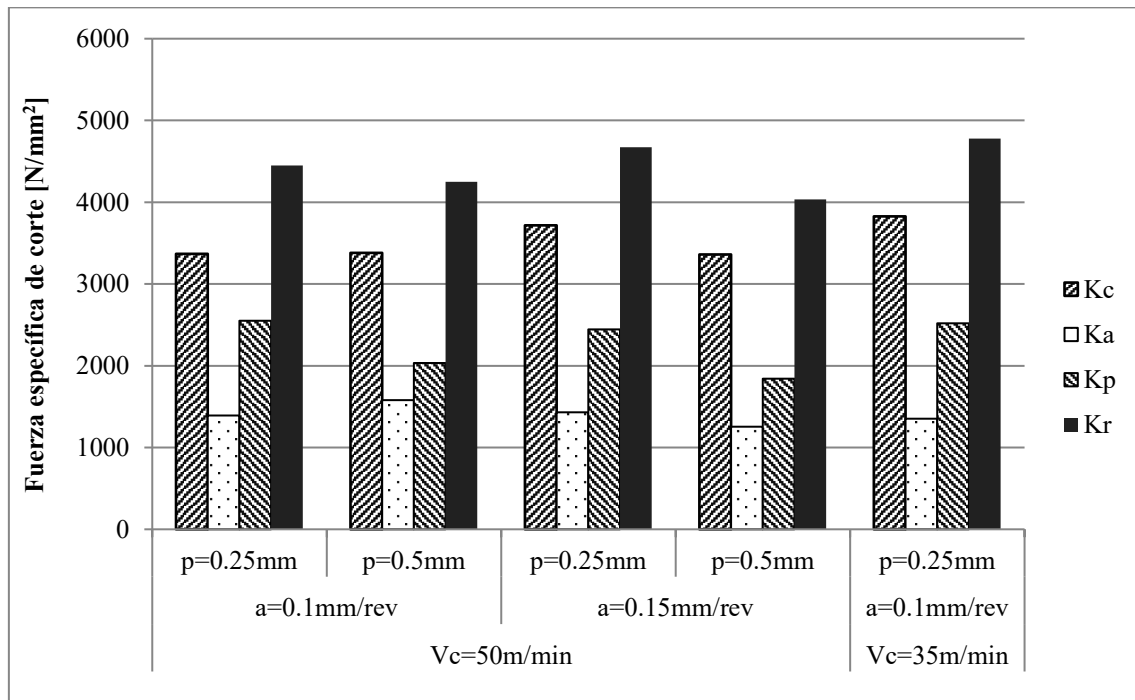
Material de corte (designación y fabricante)	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]
<b>Carburo</b> (TS2000, SECO)	35	0,1	0,25
			0,25
	50	0,1	0,5
			0,25
		0,15	0,5
			0,25
<b>PCBN</b> (CBN170, SECO)	200	0,1	0,25
			0,15
	200	0,15	0,25
			0,5
			0,15
			0,25
<b>PCBN</b> (MB8025, Mitsubishi)	300	0,15	0,5
			0,25
	200	0,15	0,25
			0,25
			0,25
			0,25
<b>PCBN</b> (7015, Sandvik)	200	0,15	0,25
			0,25

## 2.4.2. Resultados experimentales

### 2.4.2.1. Fuerza de corte

Durante los ensayos se determinaron las componentes de la fuerza de mecanizado respecto a las direcciones de los movimientos de corte, avance y penetración. En la Figura 17 y Figura 18 se muestran, para las herramientas de carburo y PCBN respectivamente, las correspondientes fuerzas específicas por unidad de sección de viruta no deformada denominadas respectivamente fuerza específica de corte ( $K_c$ ), fuerza específica de avance ( $K_f$ ) y fuerza específica de penetración ( $K_p$ ). Asimismo, se representa la fuerza específica resultante ( $K_r$ ) correspondiente a la fuerza de mecanizado total por unidad de sección de viruta.

En los ensayos con herramientas de metal duro (Figura 17) se observa una alta dependencia de la fuerza de corte específica con respecto a la velocidad de corte. Al disminuir la velocidad a 35 m/min se observa un aumento del 14 % de la fuerza de corte específica ( $K_c$ ). Este efecto se debe a que al reducirse la velocidad de corte, la temperatura en la zona de corte disminuye y por tanto se produce un menor ablandamiento térmico del material.



**Figura 17.** Componentes y resultante de la fuerza específica de mecanizado en los ensayos de torneado con las herramientas de carburo sin desgaste (herramientas nuevas).

Al analizar la fuerza resultante específica ( $K_r$ ) se puede observar que cuando aumenta la profundidad de pasada la fuerza específica se ve reducida, especialmente debido a la reducción de la componente  $K_p$ . Sin embargo, el efecto del avance en la fuerza específica resultante no es significativo. En procesos de corte es habitual que reducciones de la sección de viruta se relacionen con mayores fuerzas específicas de mecanizado. En estas operaciones de mecanizado, con una reducida profundidad de

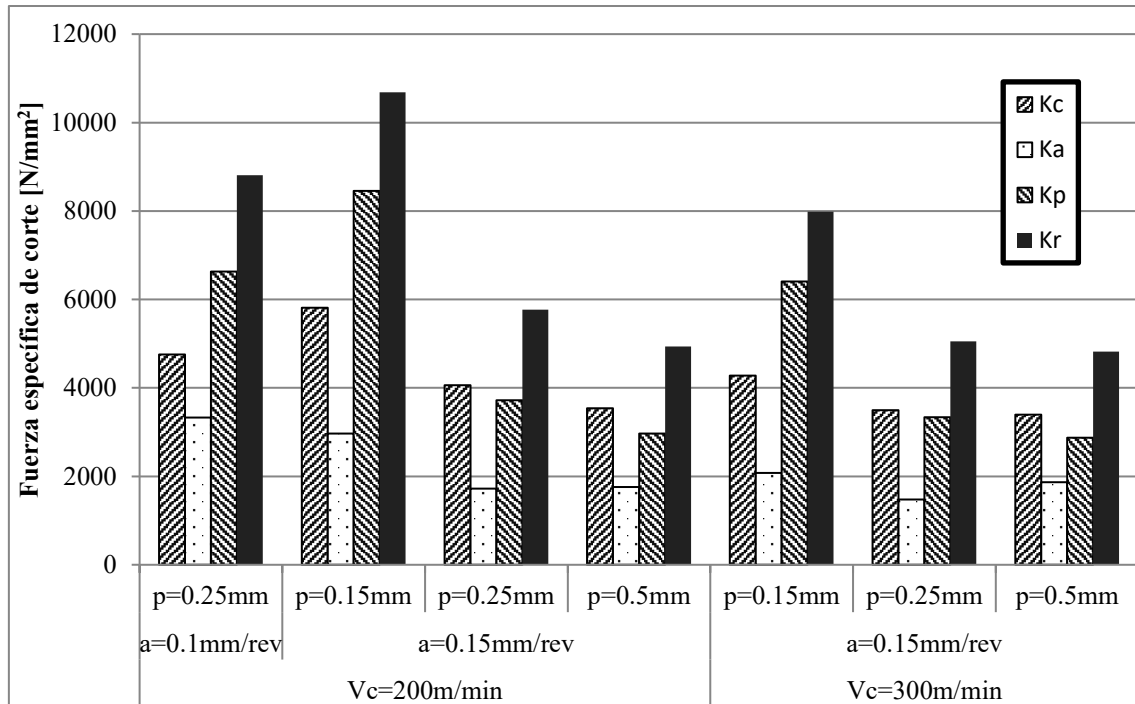
## 2.4 Ensayos en seco

pasada y material con elevado endurecimiento por deformación, la elevada influencia de la profundidad de pasada en la fuerza específica se debe principalmente al efecto del endurecimiento por deformación originado en la superficie mecanizada.

Para el análisis de las fuerzas obtenidas con herramientas PCBN (Figura 18 y Figura 19) debe considerarse que en los ensayos realizados con profundidad 0,5 mm, en los primeros instantes de corte se observó un desgaste de herramienta significativo. Este efecto puede afectar a los valores de fuerza mostrados para estos ensayos que pueden ser algo superiores a los que corresponderían a una herramienta sin desgaste.

En la Figura 18 se muestran los resultados obtenidos con la herramienta PCBN de Seco, que fue la ensayada para una mayor variedad de valores de parámetros de corte. De forma general, se observan elevados valores de fuerzas específicas (en torno al doble de los obtenidos en los ensayos con herramienta de metal duro), especialmente para valores de profundidad y avance reducidos. Al igual que para las herramientas de carburo, a menor avance y profundidad se observa un aumento en las fuerzas específicas debido al efecto de endurecimiento por deformación del Inconel 718. Sin embargo, en la herramienta PCBN este efecto es mucho más notorio debido a los menores ángulos de desprendimiento y a la menor agudeza de la arista de corte (mayor radio de filo). Cabe destacar los elevados valores obtenidos en los ensayos con herramienta PCBN para la componente de la fuerza  $K_p$ , que incluso es superior a la componente en la dirección del movimiento de corte ( $K_c$ ) en los ensayos con reducido avance y/o profundidad de pasada.

Los elevados valores de fuerzas obtenidos con herramienta PCBN se relacionan con un mayor riesgo de excesivo daño en la superficie mecanizada, lo cual puede ser un factor crítico en aplicaciones donde se requiere un estricto control de integridad superficial.

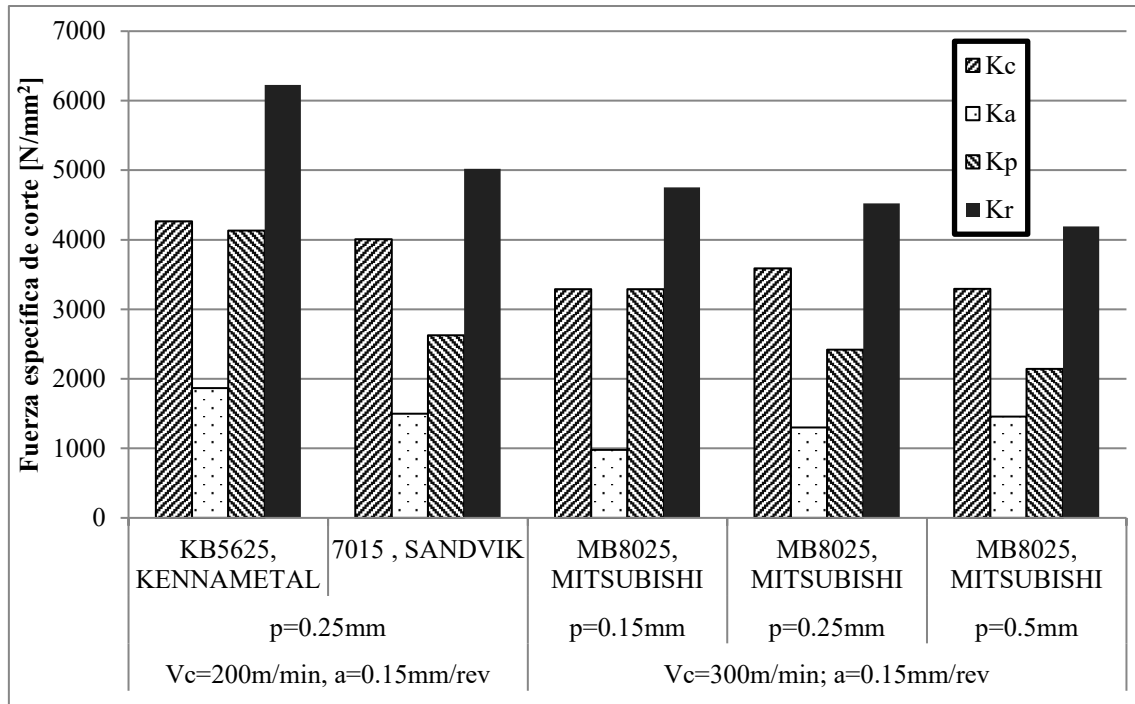


**Figura 18.** Componentes y resultante de la fuerza de corte específica en los ensayos de torneado con las herramientas de PCBN de Seco sin desgaste (herramientas nuevas).

Al aumentar la velocidad de corte se obtuvieron menores fuerzas de mecanizado, siendo mayor este efecto cuanto menor es la profundidad de pasada.

Por último, en la Figura 19 se muestran las fuerzas específicas correspondientes a los ensayos realizados con herramientas PCBN de otros fabricantes (Kennametal, Mitsubishi y Sandvik). A igualdad de parámetros de corte, las menores fuerzas específicas de mecanizado fueron las obtenidas para la herramienta de Sandvik y en menor medida para la de Mitsubishi. A pesar de las diferencias en cuanto a recubrimientos y preparación de filo, las restantes herramientas PCBN mostraron valores con diferencias reducidas en relación con las obtenidas en los ensayos con la herramienta PCBN de referencia (la de Seco). No obstante, las fuerzas fueron algo superiores para la herramienta de Kennametal y algo más reducidas para la herramienta de Mitsubishi (preparación de filo de tipo faceta en lugar de redondeo de filo como las demás). Las diferencias de fuerzas entre la herramienta de Mitsubishi y Seco fueron más significativas para la profundidad de pasada menor (0,15mm).

## 2.4 Ensayos en seco



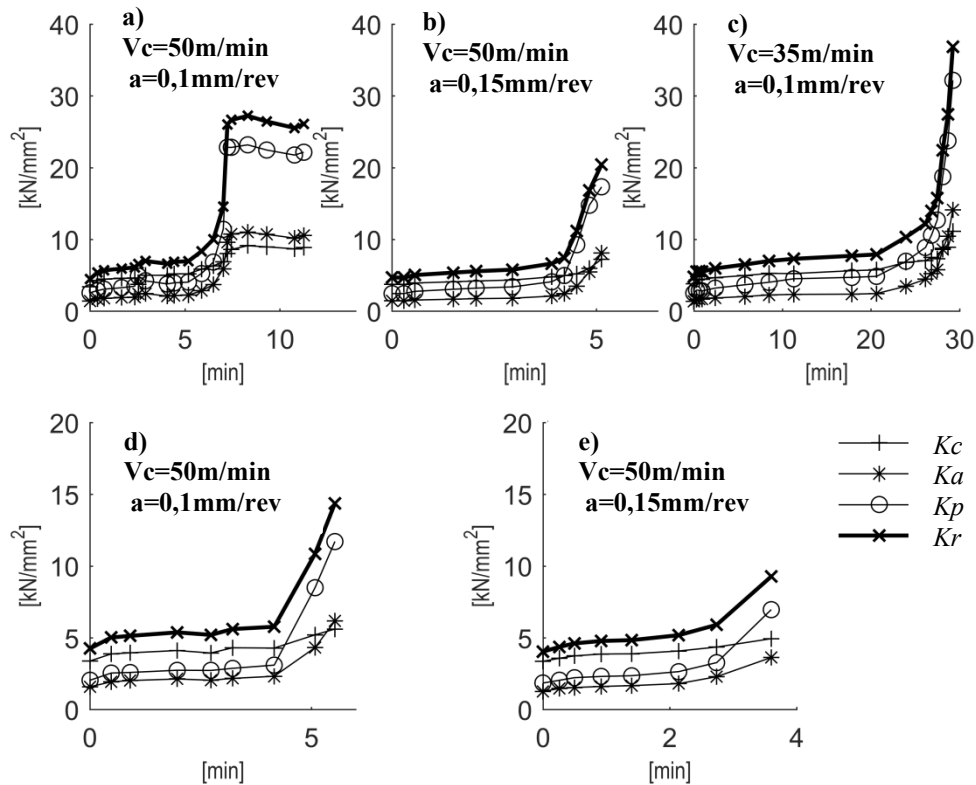
**Figura 19.** Componentes y resultante de la fuerza de corte específica en los ensayos de torneado con las herramientas de PCBN sin desgaste (herramientas nuevas).

La evolución de la fuerza de mecanizado en función de la vida de las herramientas de carburo se muestra en la Figura 20 y de la herramienta PCBN de referencia del fabricante Seco en la Figura 21. Para estas últimas no se incluyen los ensayos con profundidad de corte 0,5 mm debido a la rotura temprana del filo.

Las fuerzas con las herramientas de carburo se incrementan linealmente con el tiempo de corte en los primeros minutos de vida. Aproximadamente entre 1 y 3 minutos antes de alcanzar el final de vida, las fuerzas específicas aumentan abruptamente (especialmente la componente  $K_p$ ). Se ha de señalar que esta brusca variación de la pendiente observada en las gráficas de fuerza no se corresponde con un aumento brusco del desgaste de la herramienta, puesto que como se indicará más adelante, el desgaste aumenta de forma homogénea durante todo el ensayo.

Este resultado es de interés industrial puesto que indica que en estos procesos de mecanizado la monitorización de la fuerza radial permitiría predecir en qué momento el estado de desgaste de la herramienta está próximo a su fin de vida.

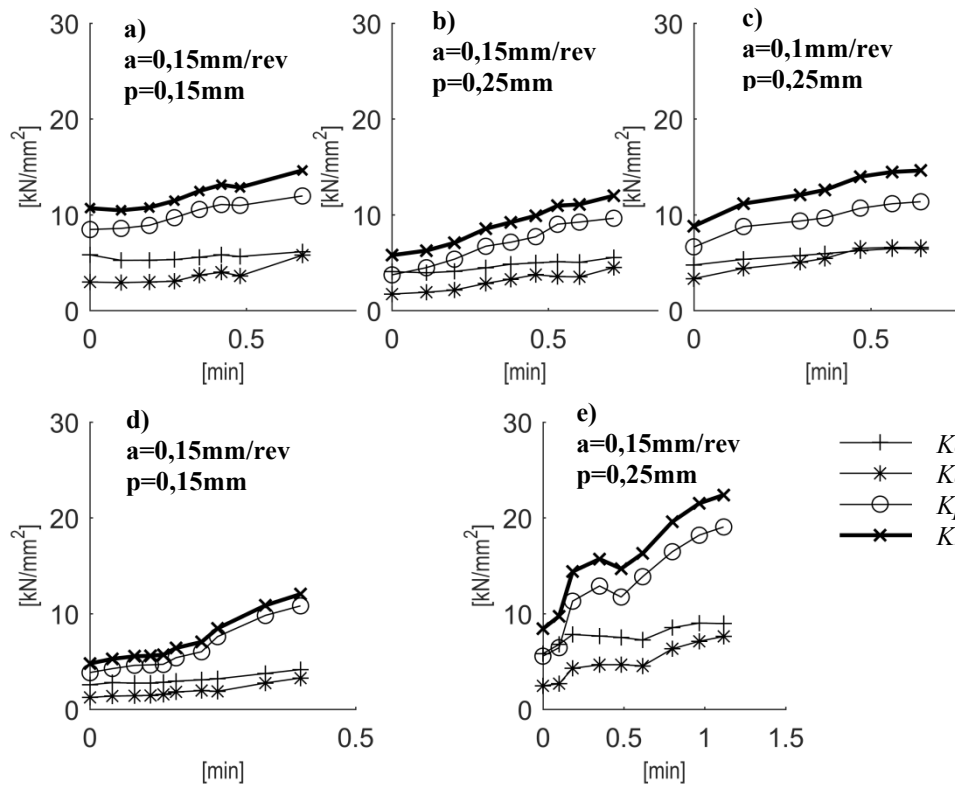




**Figura 20.** Evolución de las componentes de las fuerzas específicas para la herramienta de metal duro (TS2000, Seco). Profundidad de corte para las figuras a), b) y c) 0,5 mm y para las figuras d) y e) 0,25 mm.

La evolución de las fuerzas específicas de mecanizado para la herramienta PCBN de Seco (Figura 21) muestra una tendencia lineal durante el ensayo hasta el final de vida. La fuerza específica  $K_p$  muestra un crecimiento más rápido que el resto de componentes de las fuerzas. El hecho de que no se observe un incremento brusco de las fuerzas en la parte final de los ensayos es debido a que la geometría de las herramientas PCBN es menos afilada y por tanto menos sensible al desgaste. Por ello, en las herramientas PCBN, el control de la fuerza no permitiría establecer un criterio de sustitución de herramienta de manera tan evidente como en las herramientas de carburo.

## 2.4 Ensayos en seco



**Figura 21.** Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado para la herramienta PCBN (Seco). Velocidad de corte para las figuras a), b) y c) 200 m/min y para las figuras d) y e) 300 m/min.

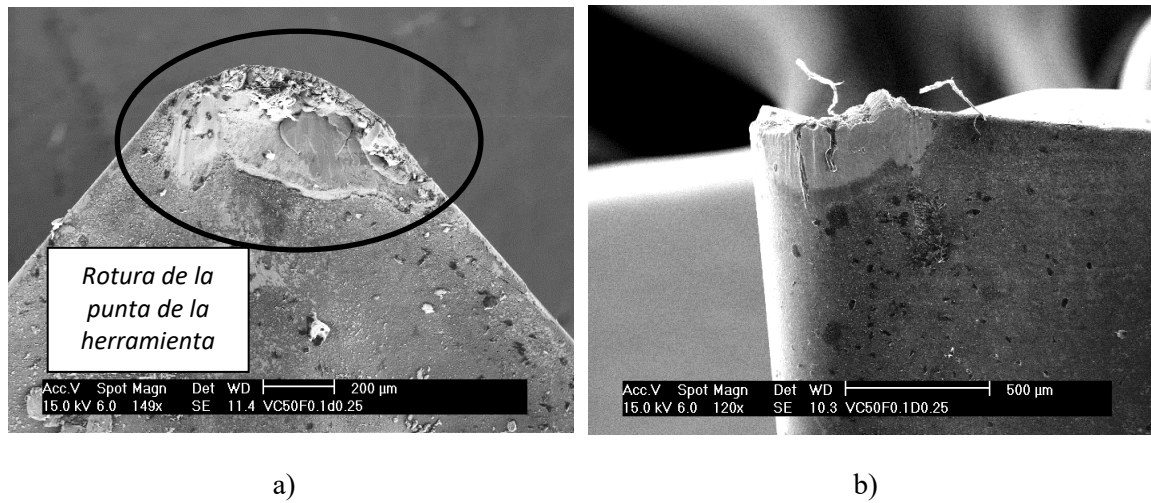
### 2.4.2.2. Desgaste

Durante los ensayos se determinó periódicamente el desgaste de herramienta para conocer su evolución con el tiempo de corte y obtener información aplicable a la definición del final de vida de herramienta en procesos de acabado sin fluido de corte.

En primer lugar, se describirán los resultados de desgaste obtenidos para herramientas de metal duro. Existen numerosos estudios sobre el desgaste de herramienta en este tipo de procesos [76] en los que se ha encontrado una gran variedad de tipos de desgaste como astillado, desgaste de flanco, adhesión o desgaste de entalla. En la Figura 22 se muestran imágenes correspondientes a los ensayos realizados en esta tesis.

Para velocidades de 50 m/min se observó que los principales desgastes originados en las herramientas de metal duro fueron astillamiento especialmente en la zona de la punta de la herramienta, desgaste de flanco, adhesión de material y desgaste de entalla (este último, se localiza en la zona del filo correspondiente al final de la profundidad de pasada). Para la velocidad de corte de 35 m/min, se observó un comportamiento similar, sin embargo, el desgaste fue más homogéneo a lo largo de todo el filo, sin observarse desgaste localizado de entalla.

En todas las condiciones se alcanzó el fin de vida de herramienta debido a que la zona afectada por el astillamiento y el desgaste de entalla alcanzó una amplitud de 0,4 mm.



**Figura 22.** Imágenes de las herramientas de carburo TS2000 de Seco con el microscopio SEM que se corresponden con el final de vida. Velocidad de corte 50 m/min, avance 0,1 mm/rev y profundidad de 0,25 mm. a) Superficie de desprendimiento, b) superficie de incidencia.

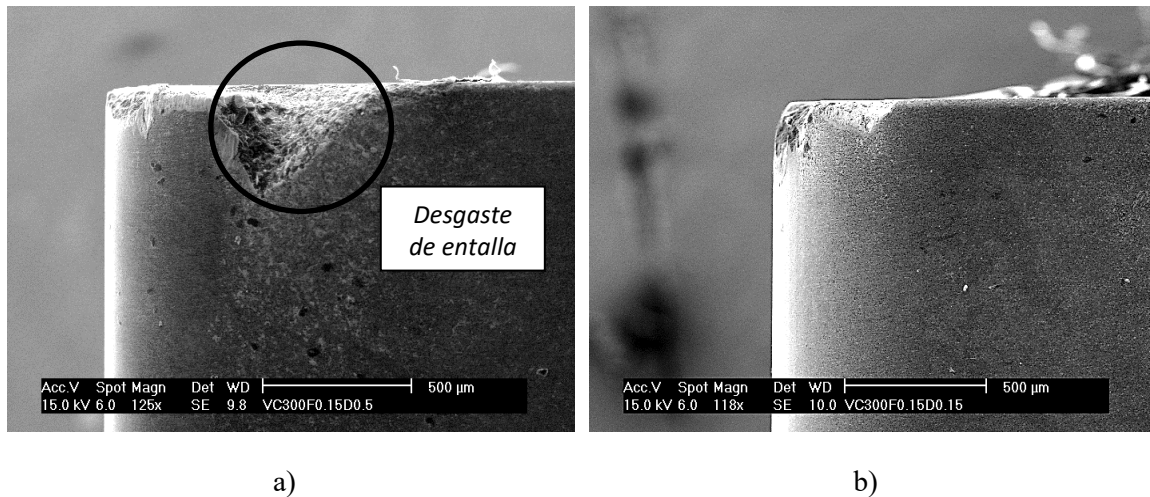
En todas las herramientas PCBN ensayadas (Seco, Sandvik Mitsubishi y Kennametal) se observó una evolución del desgaste muy similar. Los principales mecanismos de desgaste encontrados fueron adhesión, astillamiento, entalla y desgaste de cráter. Es decir, las principales diferencias con las herramientas de carburo fueron que las herramientas PCBN no sufrieron desgaste de flanco relevante, pero sí se observó desgaste de cráter. También fue común a todos los ensayos que el desgaste progresó a gran velocidad obteniéndose vidas de herramienta muy reducidas, tal y como se describirá en el siguiente punto.

El desgaste fue especialmente rápido en los ensayos con la profundidad de pasada más elevada (0,5 mm), alcanzándose en los primeros segundos del ensayo amplitudes del desgaste de entalla de en torno a 0,2 mm. También el astillado de la punta de la herramienta fue muy severo. En tiempos de corte inferiores a 1 minuto se alcanzó el fin vida debido a alcanzar un desgaste de entalla de amplitud 0,4 mm o a la rotura catastrófica del filo (ver Figura 23).

Con profundidades de pasada de 0,25 mm se observaron los mismos mecanismos de desgaste que los ensayos realizados a profundidad de 0,5 mm. El desgaste predominante fue el de entalla hasta alcanzar los 0,4 mm o una rotura catastrófica del filo, sin embargo, la vida de estas herramientas fue considerablemente más alta que para profundidad de 0,5 mm como se detallara en el apartado de vida de la herramienta.

Finalmente, con las mismas condiciones de corte y la profundidad de pasada mínima (0,15 mm) no se observó desgaste de entalla y el astillamiento, desgaste de flanco y adhesión afectó de forma más homogénea a todo el filo de corte. Este comportamiento se debe al ablandamiento térmico del material debido a las mayores temperaturas alcanzadas y por consiguiente a las menores fuerzas y tensiones en la herramienta.

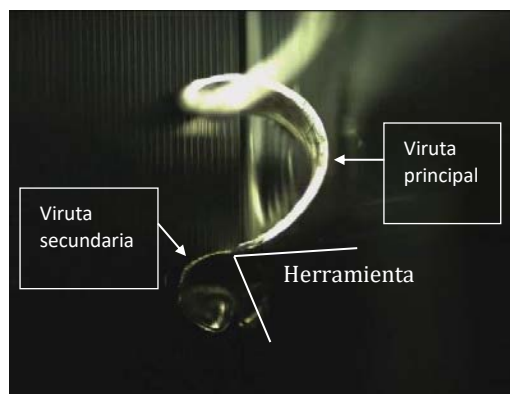
## 2.4 Ensayos en seco



**Figura 23.** Imágenes de las herramientas de PCBN de Seco con el microscopio SEM que se corresponden con el final de vida. Velocidad de corte 300 m/min, avance 0,15 mm/rev y profundidad de corte a) 0,25 mm y b) 0,15 mm.

El incremento de la velocidad de corte (se ensayó a 200 m/min y a 300 m/min), a pesar de incrementar la temperatura en la zona de corte, no afectó significativamente al desgaste de la herramienta debido a la alta resistencia a altas temperatura de las herramientas PCBN.

Por último, en todos los ensayos de desgaste con herramienta PCBN, para estados de desgaste suficientemente avanzados, se observó la formación de una rebaba significativa en la pieza mecanizada. Este fenómeno se asocia al efecto del desgaste de entalla cuya geometría genera un “canal” en la zona final del filo activo de corte por el que fluye el material. Mediante imágenes obtenidas con una cámara de alta velocidad y óptica de ampliación de tipo Macro se observó que esa rebaba originaba una viruta secundaria, tal y como se muestra en la Figura 24.



**Figura 24.** Formación de la viruta secundaria en ensayos de mecanizado con herramienta PCBN MB8025 de Mitsubishi. Velocidad (imágenes obtenidas mediante cámara de alta velocidad). Velocidad de corte 300 m/min, avance 0,15mm/rev y profundidad de corte 0,15 mm.

### 2.4.2.3. Vida de la herramienta

Una de las características consideradas para valorar la capacidad de una herramienta de corte es su vida de filo (duración de la herramienta hasta que es necesario sustituirla por haber alcanzado un determinado nivel de desgaste). Para realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con herramientas PCBN y de metal duro con el objetivo de determinar la viabilidad industrial de las mismas, es necesario considerar otros parámetros más relacionados con la productividad del proceso. En concreto, también se consideraron la superficie mecanizada por filo ( $S_{filo}$ ) y la superficie mecanizada por unidad de tiempo ( $S_{mec/t}$ ). Estas magnitudes se calcularon con las siguientes expresiones:

- Superficie mecanizada por unidad de tiempo [ $mm^2/s$ ]:

$$S_{mec/t} = Vc \cdot a \cdot 1000/60 \quad (4)$$

Donde  $Vc$  es la velocidad de corte [ $m/min$ ] y  $a$  es el avance [ $mm$ ]

- Superficie mecanizada por filo de corte [ $mm^2/filo$ ]:

$$S_{filo} = S_{mec/t} \cdot T \cdot 60 \quad (5)$$

Donde  $T$  es el tiempo mecanizado por filo hasta el final de vida [ $min$ ].

En la Tabla 7 se pueden observar los valores de vida, superficie mecanizada y superficie por unidad de tiempo para las condiciones de corte ensayadas en seco con la herramienta de carburo y las diferentes herramientas PCBN.

## 2.4 Ensayos en seco

**Tabla 7.** Resultados de la vida de la herramienta, superficie mecanizada en tiempo y superficie mecanizada por filo para los ensayos realizados.

Herramienta	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]	Vida [min]	Sup. mecanizada en tiempo [mm <sup>2</sup> /s]	Sup. mecanizada por filo [mm <sup>2</sup> /filo]
<b>Carburo</b>	<b>35</b>	<b>0,1</b>	0,25	28,7	58,3	100400
(TS2000, Seco)	<b>50</b>	<b>0,1</b>	0,25	10,1	83,3	50480
			0,5	6	83,3	30000
		<b>0,15</b>	0,25	5,4	125	40500
			0,5	3,9	125	29250
<b>PCBN</b>	<b>200</b>	<b>0,1</b>	0,25	0,7	333,3	14000
(CBN170, Seco)	<b>200</b>	<b>0,15</b>	0,15	0,8	500	24000
			0,25	0,8	500	24000
			0,5	0,2	500	6000
			0,15	0,8	750	36000
	<b>300</b>	<b>0,15</b>	0,25	0,8	750	36000
			0,5	0,15	750	6750
<b>PCBN</b>			0,15	1,2	750	54000
(MB8025, Mitsubishi)	<b>300</b>	<b>0,15</b>	0,25	0,5	750	22500
			0,5	0,3	750	13500
<b>PCBN</b> (KB5625, Kennametal)	<b>200</b>	<b>0,15</b>	0,25	0,4	500	12000
<b>PCBN</b> (7015, Sandvik)	<b>200</b>	<b>0,15</b>	0,25	0,6	500	18000

La herramienta de carburo a menor velocidad de corte (35 m/min) alcanzó los mejores resultados en términos de vida de herramienta (29 minutos) y superficie mecanizada por filo (100450 mm<sup>2</sup>/filo). En cambio, la superficie mecanizada por unidad de tiempo fue moderada debido a las bajas velocidades de corte para este tipo de herramientas. No obstante, estos resultados confirman la viabilidad industrial del uso de herramientas de carburo en operaciones de acabado sin fluido de corte en Inconel 718.

En cuanto a herramientas PCBN se observó que las vidas fueron muy reducidas para todas las condiciones de corte ensayadas (entre 0,2 a 1,2 minutos). Dentro de ese rango, se observan diferencias significativas en función de la herramienta PCBN concreta y de los parámetros de corte. Incluso, en el ensayo en el que se obtuvo la mayor duración de filo (1,2 minutos), que fue con la herramienta PCBN de Mitsubishi con velocidad de corte 300 m/min, avance 0,15 mm/rev y profundidad de pasada 0,15 mm, se obtuvieron

valores de superficie mecanizada por filo similares a los obtenidos con la herramienta de metal duro. Además, debido a la elevada velocidad de corte, la superficie mecanizada por unidad de tiempo fue muy superior para la herramienta PCBN. No obstante, en ningún caso esa vida de herramienta es suficiente como para permitir su aplicación industrial en operaciones de acabado en seco de Inconel 718. Debe considerarse que, debido a la variabilidad propia de los procesos de mecanizado, en sistemas productivos deben establecerse criterios de sustitución de herramienta con un cierto margen de seguridad. Además, otro factor a considerar es que el coste por filo de las herramientas PCBN es unas 10 veces superior al coste de las herramientas de carburo. Por ello, no se realizó un análisis sistemático de las condiciones de mecanizado para optimizar estos procesos. A continuación, se indican algunos resultados obtenidos en los ensayos con este tipo de herramientas.

La profundidad de la pasada fue uno de los parámetros más críticos ya que como se ha comentado en el apartado de desgaste, al aumentar la profundidad se obtenían vidas de herramienta muy inferiores debido al desgaste de entalla.

Como se indicó en el apartado anterior, la velocidad de corte tuvo una influencia reducida en la vida de las herramientas PCBN por lo que se obtuvieron mayores superficies mecanizadas por filo para la mayor velocidad de corte considerada (300 m/min). En cuanto al avance no se observaron cambios significativos en la vida de las herramientas.

En general, el principal problema de mecanizar sin fluido de corte es el gran aumento de la temperatura en la zona de corte por lo que las herramientas PCBN, que soportan temperaturas superiores a 1000 °C manteniendo elevadas propiedades mecánicas, suelen tener un buen comportamiento en estos procesos. Sin embargo, en las operaciones de acabado en seco de Inconel 718 con herramientas PCBN se observó una mayor inestabilidad en el corte por lo que fueron predominantes los mecanismos de desgaste relacionados con la fragilidad de la herramienta. Esta afirmación se justifica en base de los siguientes puntos:

- Las plaquitas PCBN mostraron una vida mucho menor que las herramientas de metal duro.
- El aumento la profundidad de pasada redujo significativamente la vida de la herramienta.
- El aumento de la velocidad de corte, que incrementa las temperaturas pero mejora la estabilidad del corte, redujo poco la duración de las herramientas PCBN.

#### **2.4.2.4. Rugosidad**

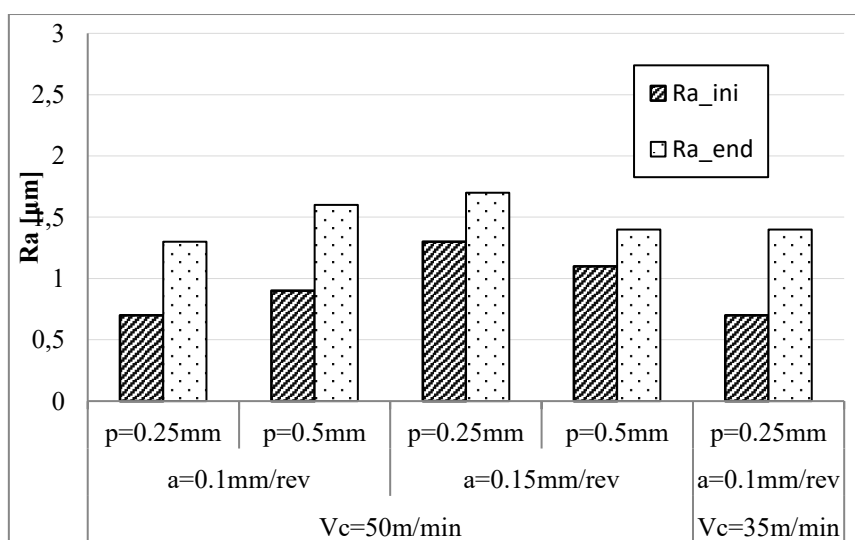
La rugosidad superficial de la pieza se cuantificó mediante la rugosidad media aritmética (Ra) que se midió periódicamente con el fin de analizar su evolución con el desgaste de la herramienta y compararla con la evolución de la fuerza y el desgaste. En la Figura 25 y Figura 26 se puede observar la rugosidad para las herramientas nuevas y

## 2.4 Ensayos en seco

a fin de vida en función de los parámetros de corte y herramientas ensayadas. En estas gráficas no se incluyen los resultados de las herramientas PCBN con profundidad de 0,5 mm ya que el elevado desgaste generado en los primeros instantes de vida no permite analizar la influencia del desgaste de la herramienta.

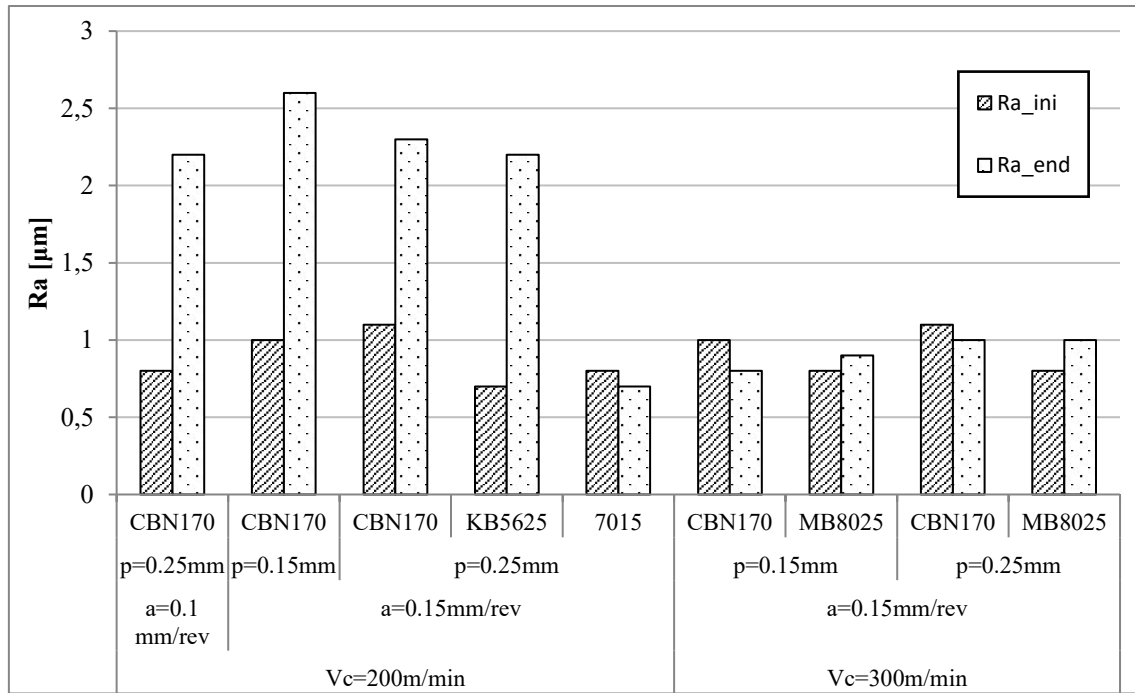
Durante los primeros instantes de vida se puede observar un buen comportamiento de las herramientas para todas las condiciones y herramientas ensayadas, siendo la rugosidad media de entre 0,7  $\mu\text{m}$  a 1,3  $\mu\text{m}$ . Tanto para herramientas PCBN como para herramientas de carburo se observó que para el avance más reducido (0,1 mm/rev) la rugosidad inicial fue ligeramente inferior que para el avance 0,15 mm/rev. La profundidad de pasada tiene un efecto más moderado en la rugosidad obtenida en los ensayos con herramienta sin desgaste.

La evolución de la rugosidad al aumentar el desgaste de la herramienta fue muy variable dependiendo de los tipos de desgaste predominantes en cada ensayo. En las condiciones de corte en las que el desgaste predominante fue el de entalla, la rugosidad se incrementó de forma moderada. Sin embargo, en los ensayos en los que el desgaste predominante se produjo en la punta de la herramienta (fundamentalmente astillado y desgaste de flanco) la rugosidad se incrementó significativamente alcanzando valores superiores a 2  $\mu\text{m}$ .



**Figura 25.** Rugosidad media medida al inicio del ensayo de mecanizado ( $R_{a\_ini}$ ) y al final de la vida de la herramienta ( $R_{a\_end}$ ) con la herramienta de carburo TS2000.





**Figura 26.** Rugosidad media medida al inicio del ensayo de mecanizado ( $Ra_{ini}$ ) y al final de la vida de la herramienta ( $Ra_{end}$ ) con diferentes herramientas de PCBN.

## 2.5. Ensayos con fluido de corte a presión convencional

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en ensayos de mecanizado de Inconel 718 empleando refrigeración mediante fluido de corte a presión convencional (7,5 bar) y distintas herramientas PCBN. Para determinar la viabilidad industrial e interés de estas herramientas se realizará un análisis comparativo con los resultados obtenidos con herramientas de metal duro.

### 2.5.1. Condiciones de corte

Las condiciones de corte realizadas en los ensayos de mecanizado de acabado en Inconel 718 con fluido de corte a presión convencional se pueden ver en la Tabla 8. La introducción de fluido se realiza mediante el mismo sistema de alta presión (*Duo Jetstream Tooling* de Seco Tools). En ella se pueden distinguir tres grupos en función de los parámetros de cortes seleccionados y materiales.

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

**Tabla 8.** Condiciones de corte para los ensayos realizado con herramientas de carburo y PCBN a presión convencional.

Material de corte (designación y fabricante)	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]
<b>Carburo</b> (TS2000, SECO)	50 / 70	0,1 / 0,15	0,25
<b>PCBN</b> (CBN170, SECO)	200 / 250 / 300	0,1 / 0,15	0,15 / 0,25
<b>PCBN</b> (MB8025, Mitsubishi) (KB5625, Kennametal) (7015, Sandvik)	250 / 300	0,1 / 0,15	0,15

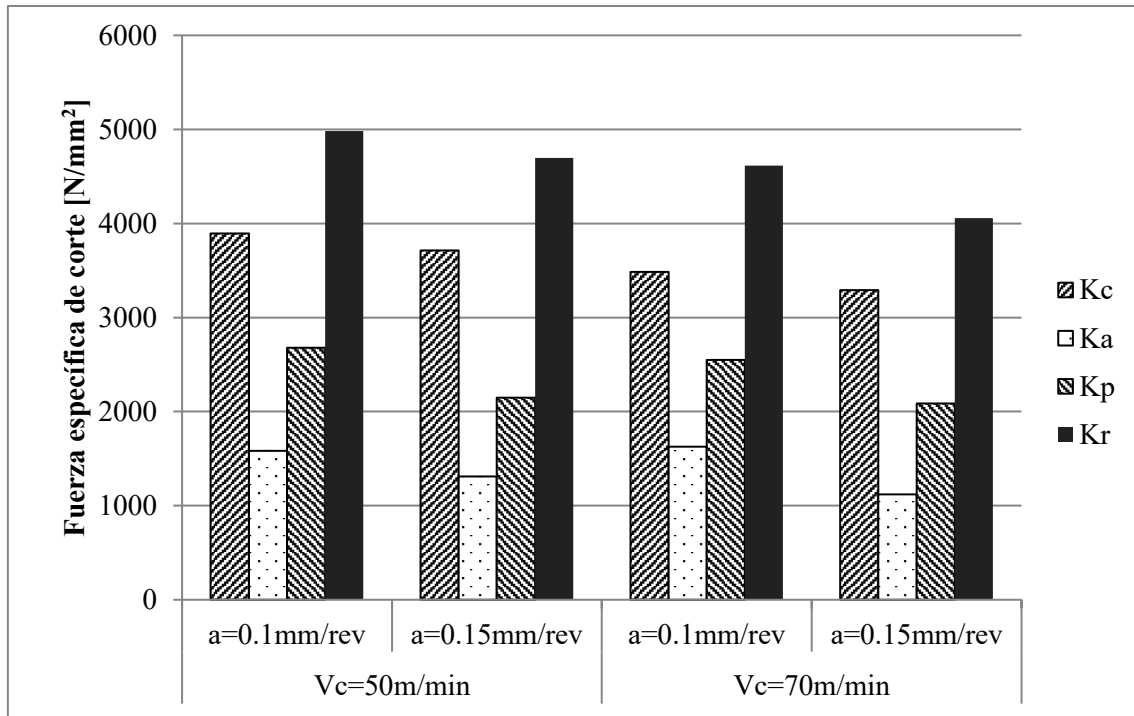
### 2.5.2. Resultados

#### 2.5.2.1. Fuerza de corte

Al igual que en el punto 2.4 correspondiente a los ensayos en seco, a continuación, se realiza el análisis de las componentes de la fuerza específica de corte  $K_c$ ,  $K_f$ ,  $K_p$  (componentes de la fuerza según las direcciones del movimiento de corte, avance y penetración divididas entre la sección de viruta). Asimismo, se analizan los valores de la fuerza específica resultante ( $K_r$ ).

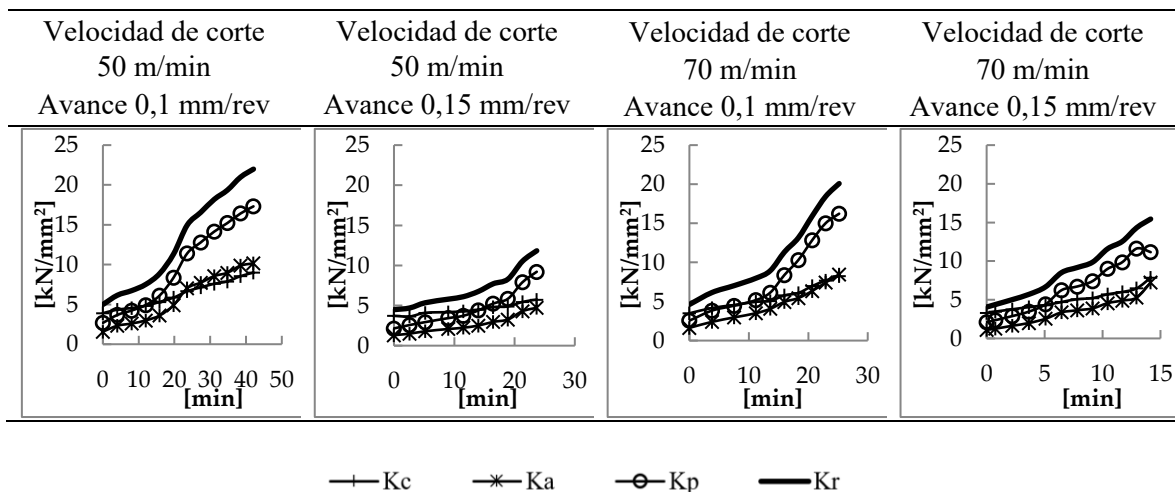
En la Figura 27 se compararon los resultados obtenidos para la herramienta de carburo de Seco en la primera pasada de corte, es decir con la herramienta sin desgastar. Se obtuvieron valores entre  $3300 \text{ N/mm}^2$  y  $3900 \text{ N/mm}^2$  para la fuerza específica de corte ( $K_c$ ). Al aumentar la velocidad de corte de  $50 \text{ m/min}$  a  $70 \text{ m/min}$ , la fuerza de corte específica ( $K_c$ ) se redujo moderadamente, alrededor de un 10 %. Esto se debe principalmente al ablandamiento del material debido a las mayores temperaturas en la zona de corte.

Al incrementar el avance, se observó una reducción de la fuerza específica de corte de entre un 5 % y 10%. Este efecto es habitual en procesos de mecanizado, especialmente en materiales con un elevado endurecimiento por deformación como el Inconel 718.



**Figura 27.** Componentes y resultante de la fuerza específica de mecanizado en los ensayos de torneado con fluido de corte a presión convencional con las herramientas de carburo sin desgaste (herramientas nuevas).

En la Figura 28 se muestra la evolución de las componentes y de la resultante de la fuerza específica de mecanizado en función del tiempo de corte para los ensayos realizados con herramientas de carburo.



**Figura 28.** Evolución de las componentes de la fuerza de específica de mecanizado para la herramienta de carburo (TS2000).

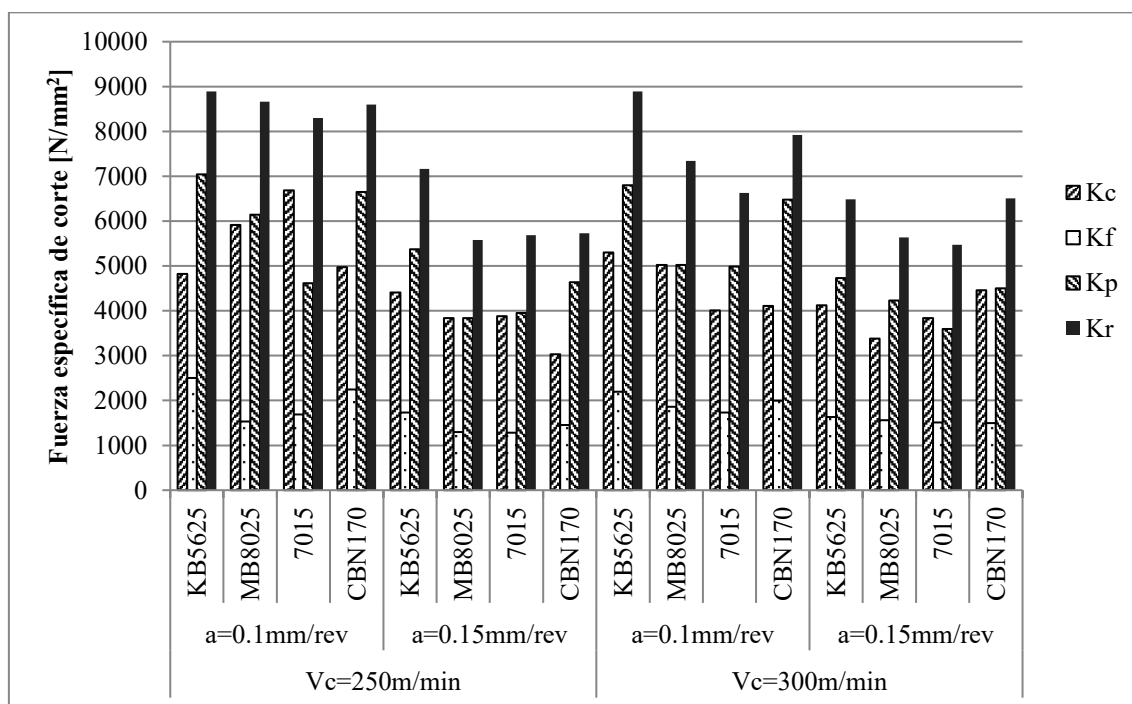
Se aprecia un crecimiento prácticamente lineal con pendiente constante para la fuerza específica de avance y de corte durante toda la duración de la herramienta. Sin embargo, la fuerza específica de penetración ( $K_p$ ) sí muestra 2 zonas diferenciadas; con un crecimiento inicial con pendiente similar a la de las otras componentes de la fuerza y una zona final en la que se acelera el crecimiento de la fuerza. Este comportamiento de

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

la componente  $K_p$  es similar al observado en los ensayos en seco, aunque en los ensayos en seco el incremento de la pendiente era más pronunciado y se observaba también en la fuerza específica de avance ( $K_a$ ). Por ello, al igual que en los ensayos en seco con herramienta de carburo, en el mecanizado con fluido de corte a presión convencional, la monitorización de la fuerza de mecanizado puede aplicarse al control del desgaste y establecimiento del criterio de sustitución de herramienta.

La Figura 29 y la Figura 30 muestran las fuerzas específicas de mecanizado para los ensayos realizados con herramientas PCBN en operaciones de acabado con fluido de corte a presión convencional.

El rango de valores de las fuerzas específicas de mecanizado de las herramientas PCBN fue superior a las de herramientas de carburo. Esto es debido a la geometría menos afilada y en menor medida al mayor radio de punta de las herramientas PCBN. Los valores de la fuerza específica resultante ( $K_r$ ) oscilan entre  $4600 \text{ N/mm}^2$  y  $9000 \text{ N/mm}^2$ . Los mayores valores de fuerza se obtuvieron con la herramienta KB5625 y en segundo lugar para la CBN170 ( $8700 \text{ N/mm}^2$  y  $6500 \text{ N/mm}^2$ ). Estas herramientas presentaron un redondeo del filo de corte similar de  $25 \mu\text{m}$ . La herramienta MB8025 con filo achaflanado de  $50 \mu\text{m}$  y la herramienta 7015 con un filo elíptico de radio menor de  $15 \mu\text{m}$  presentaron valores de fuerza específica inferiores (entre  $5000 \text{ N/mm}^2$  y  $6500 \text{ N/mm}^2$ ).

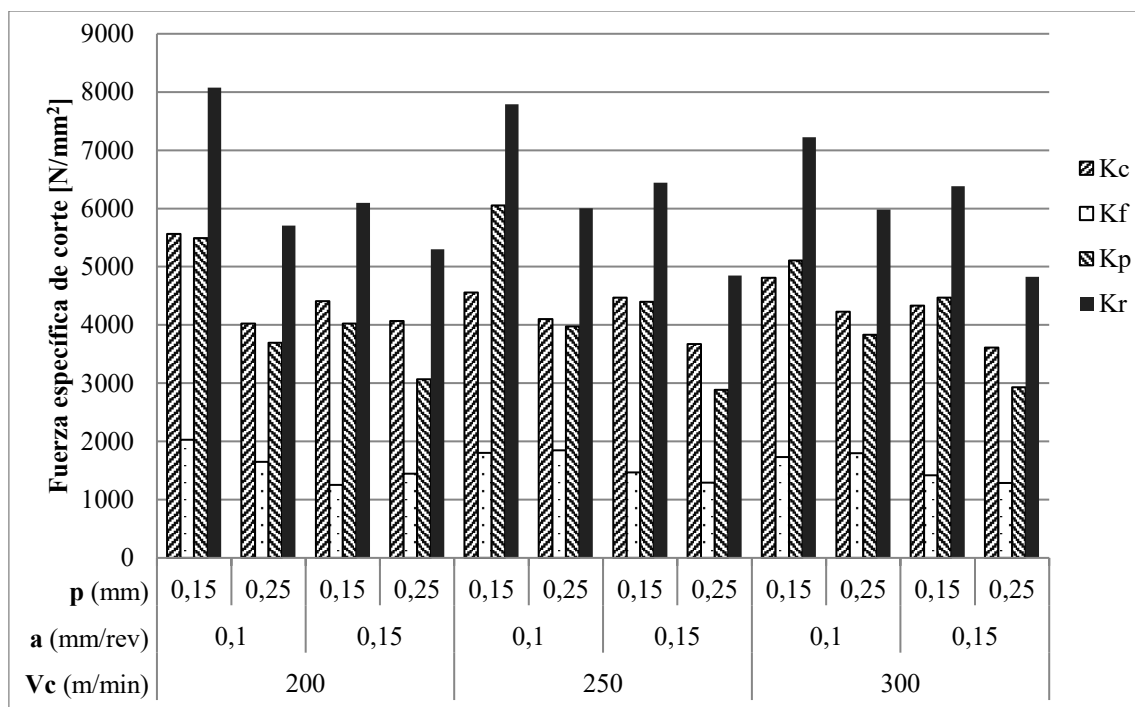


**Figura 29.** Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN. Profundidad de 0,15 mm.

Al comparar la herramienta de PCBN de Seco (CBN170) con y sin fluido de corte bajo las mismas condiciones de mecanizado (velocidad 300 m/min, avance de 0,15 mm/rev, y profundidad 0,15 mm) se obtuvieron algunas conclusiones. Las fuerzas específicas

disminuyeron más de un 18% cuando se usó fluido de corte, esto principalmente es por una reducción de la fuerza en el sentido radial normal al sentido de corte, y debido a la menor fricción originada debido a la presencia de lubricante esta se vio disminuida.

En los ensayos realizados a una velocidad de corte superior se observó generalmente una fuerza específica de corte ( $K_r$ ) inferior (en torno al 10 %). Esto puede ser originado por las altas temperaturas presentes en la pieza de trabajo y herramienta aun presentes con el uso del fluido de corte, esto conlleva a que la herramienta se encuentre un material más reblandecido. Pero en algunos casos sobre todo a avance de 0,15 mm/rev se observó que las fuerzas prácticamente no variaban con la velocidad. La reducción del avance supuso un incremento de las fuerzas de mecanizado específicas (entre el 15 y 40 %).



**Figura 30.** Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN de Seco (CBN170).

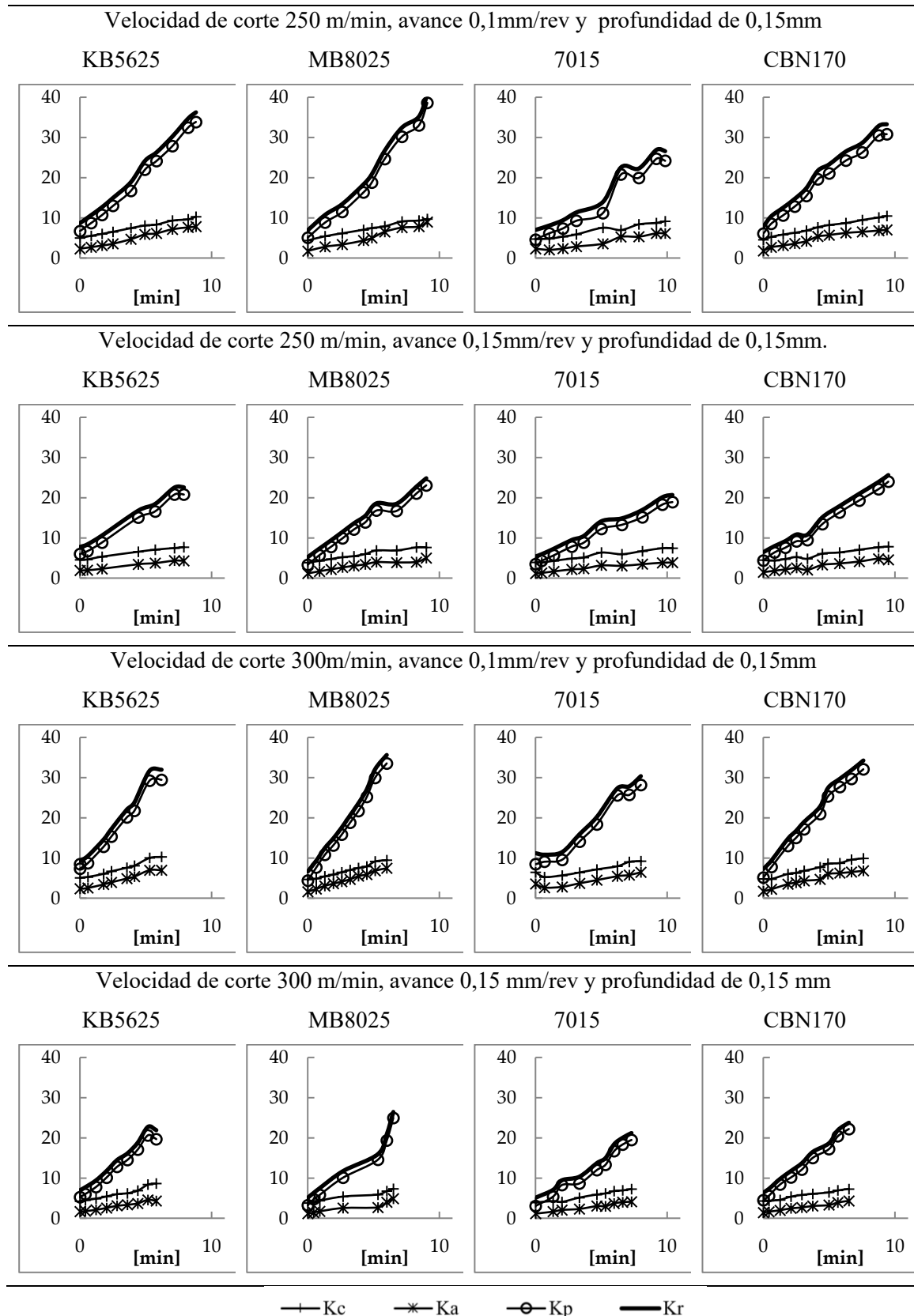
En la Figura 31 se muestra la evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado con el tiempo de corte en los ensayos con herramienta PCBN. Al igual que se describió para los ensayos en seco, también en los ensayos con fluido de corte a presión convencional, el desgaste de la herramienta PCBN provocó un incremento de la fuerza de mecanizado aproximadamente lineal con pendiente constante.

La evolución de la fuerza específica de penetración ( $K_p$ ) tuvo un crecimiento con pendiente mayor que el de las otras componentes de la fuerza. Esta tendencia también fue observada en los ensayos en seco descritos en el apartado anterior. Los valores de  $K_p$  correspondientes a fin de vida de herramienta fueron entre 5 y 8 veces superior a los medidos con herramienta nueva. Como se describirá en el apartado 2.5.2.2, el principal tipo de desgaste de herramienta en estos ensayos fue el desgaste de flanco que provoca

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

grandes incrementos de la componente de la fuerza  $K_p$  debido al empuje sobre el flanco que provoca la recuperación elástica del material que fluye por debajo del filo de corte (*ploughing force*). También en este caso, la monitorización de la fuerza específica  $K_p$  en procesos industriales aportaría información relevante del estado de desgaste de la herramienta.

Aunque en la mayoría de casos el incremento de las fuerzas es aproximadamente lineal, en algunas condiciones se observó crecimientos finales con mayor pendiente. Esto se puede deber principalmente al efecto de otros desgastes en la herramienta (principalmente desgaste de astillado).



**Figura 31.** Evolución de las fuerzas específicas de mecanizado [kN/mm<sup>2</sup>] para las herramientas de PCBN.

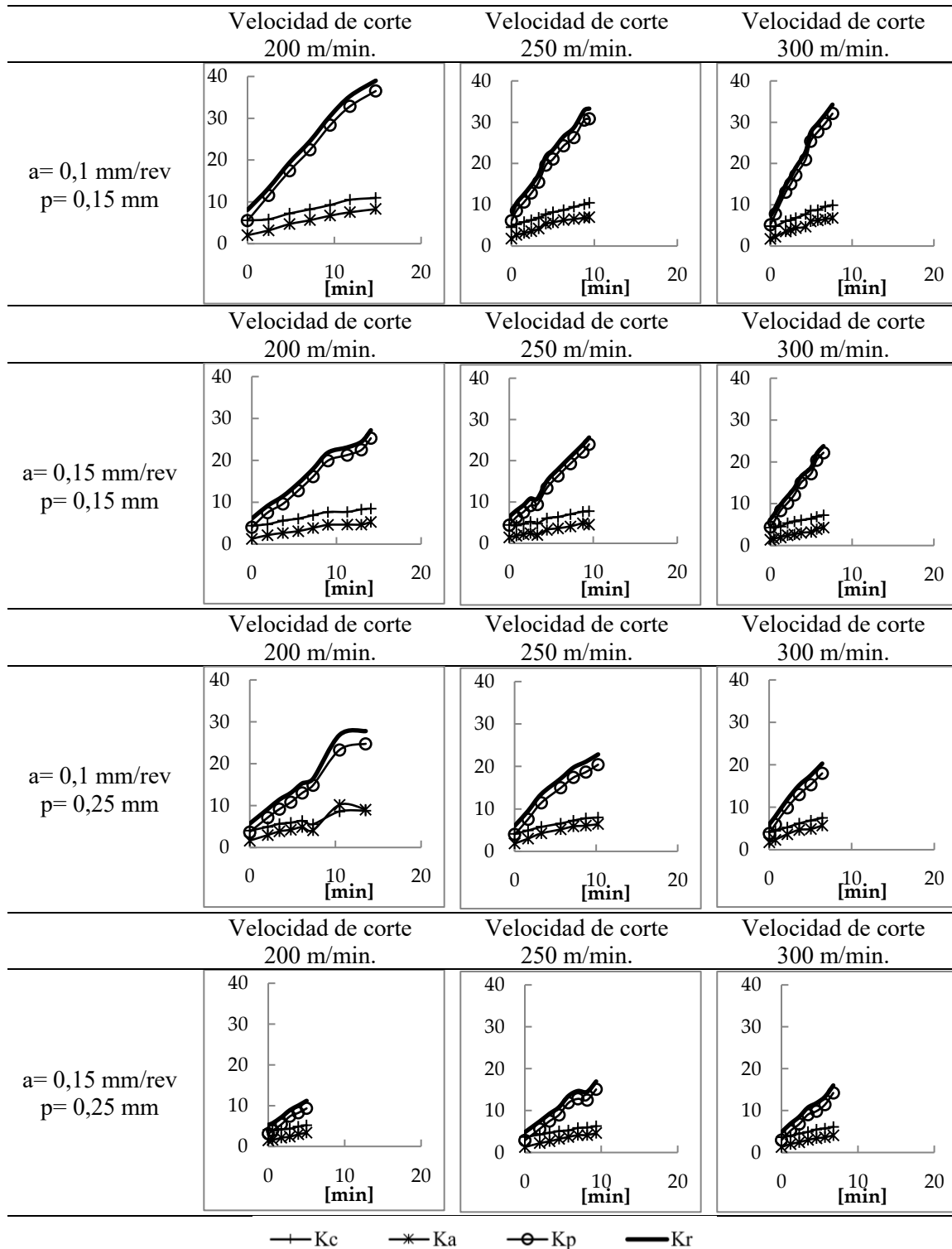
En los ensayos con herramienta PCBN se obtuvieron valores de fuerzas específicas finales muy elevados (correspondientes al estado de fin de vida de la herramienta). En

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

concreto, valores de entre 20000 y 25000 N/mm<sup>2</sup> para avance de 0,15 mm/rev, y valores de alrededor de 40000 N/mm<sup>2</sup> para avance de 0,1 mm/rev. La herramienta PCBN 7015 fue la que alcanzó menores valores de fuerzas específicas resultantes obteniéndose valores en condiciones de fin de vida entre 2,8 y 3,5 veces superiores a las fuerzas obtenidas con herramienta nueva. La herramienta MB8025 fue la que mostró un incremento de fuerzas con el desgaste mayor alcanzándose valores entre 4 y 5 veces el valor de fuerzas con herramienta nueva. Las restantes herramientas, caracterizadas por un filo con redondeo de radio 25 µm, tuvieron una evolución intermedia entre las MB8025 y 7015.

La herramienta PCBN de referencia (herramienta CBN170 del fabricante SECO) se ensayó en un mayor rango de parámetros de corte. Los resultados de evolución de las tres componentes y resultante de las fuerzas específicas se muestran en la Figura 32.





**Figura 32.** Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado [ $\text{kN/mm}^2$ ] para la herramienta de SECO (CBN170) en condiciones de fluido de corte a presión convencional (7,5 bar).

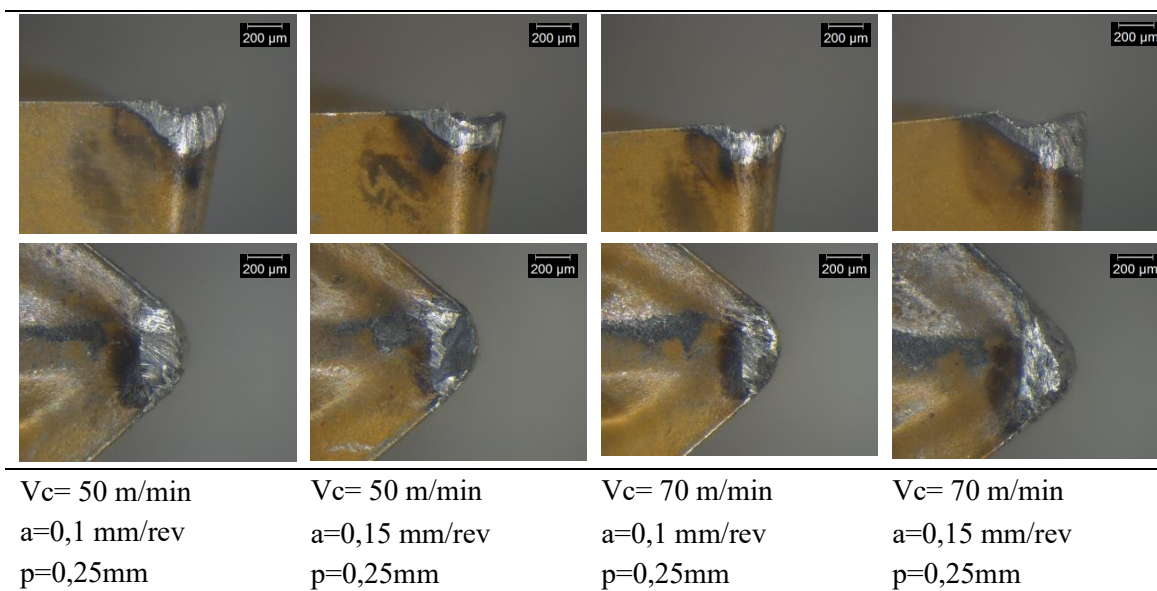
Los mayores valores de fuerza específica se alcanzaron con las condiciones de menor sección de viruta (profundidad 0,15 mm y avance 0,1 mm/rev). En estos ensayos también se observó que a medida que se reduce la velocidad de corte, la fuerza específica fue aumentando.

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

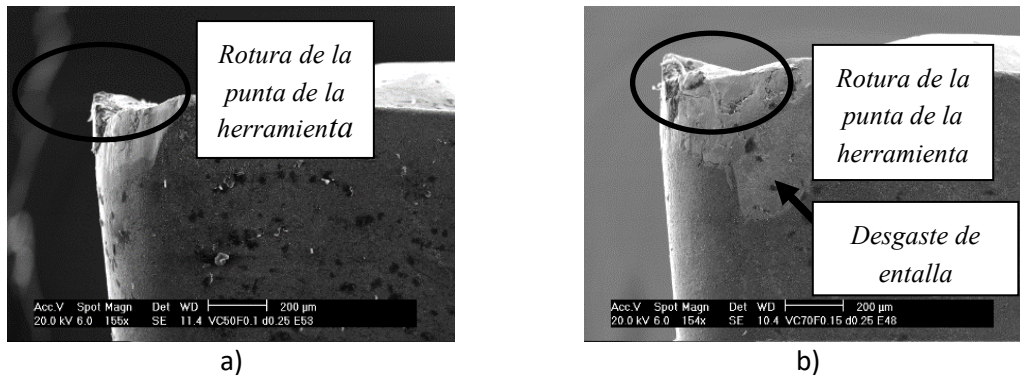
### 2.5.2.2. Desgaste

Los tipos de desgaste observados en los ensayos realizados con fluido de corte a presión convencional con la herramienta de carburo y con las herramientas PCBN fueron muy diferentes por lo que serán analizados a continuación por separado.

El principal tipo de desgaste producido en los ensayos con herramienta de carburo fue el de astillamiento del filo de corte de la herramienta (pequeñas roturas frágiles que afectaban a la superficie de desprendimiento e incidencia). Este desgaste se observó desde los primeros instantes de mecanizado, produciéndose también desgaste de entalla, desgaste de flanco y adhesión. El desgaste dominante que determinó el fin de vida de la herramienta fue en todos los casos el astillamiento de filo que debilitó la herramienta e incrementó las fuerzas de mecanizado provocando la rotura catastrófica del filo. El desgaste de entalla también aumentó a lo largo del ensayo, pero en ninguna condición de mecanizado alcanzó anchuras superiores a 0,2 mm. En la Figura 33 se puede observar el estado de desgaste correspondiente al final de vida en las cuatro condiciones de corte consideradas en los ensayos con herramienta de metal duro. Para cada condición se muestran imágenes de la herramienta obtenidas por microscopía óptica correspondientes a las superficies de incidencia y desprendimiento. En la Figura 34 se muestran imágenes obtenidas mediante un microscopio electrónico correspondientes al fin de vida de herramienta en los ensayos con velocidad de corte 50 m/min y avance 0,1 mm/rev y con velocidad de corte 70 m/min y avance 0,15 mm/rev.



**Figura 33.** Imágenes del desgaste a final de vida de las herramientas TS2000 (Microscopio óptico): superficie de incidencia (imagen superior) y superficie de desprendimiento (imagen inferior).

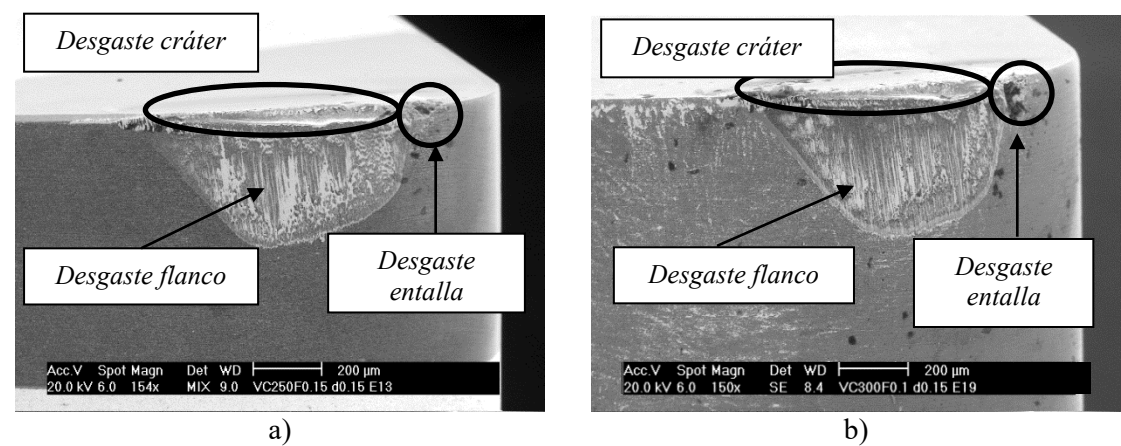


**Figura 34.** Imágenes del desgaste a final de vida de las herramientas TS2000 (Microscopio SEM). a)  $V_c=50\text{m/min}$ ,  $a=0,1\text{mm/rev}$  b)  $V_c=70\text{m/min}$ ,  $a=0,15\text{mm/rev}$

Las roturas del filo se produjeron de manera progresiva, perdiendo poco a poco la geometría del filo de corte. Esto acabó con una rotura total y con un peor comportamiento de la herramienta que pudo ser determinado por peores acabados superficiales.

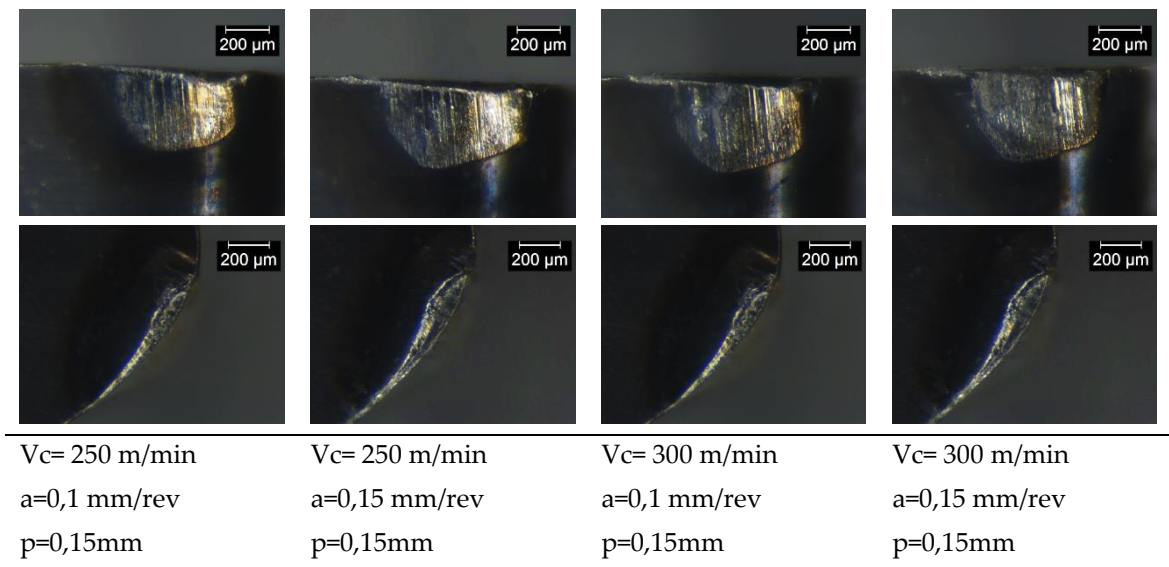
En relación con el desgaste observado en los ensayos con las distintas herramientas PCBN consideradas, a pesar de las diferencias entre ellas de geometría, recubrimiento y contenido de CBN, la progresión del desgaste fue muy similar en todos los casos. Desde los primeros instantes del ensayo se observó desgaste de flanco, adhesión del material debido a las altas temperaturas y presiones en la zona de corte, moderado astillamiento del filo y desgaste de entalla. A partir de tiempos de corte de unos 5 minutos se identificó en la superficie de desprendimiento la aparición de desgaste de cráter. En general el cráter fue difícil de detectar por su pequeña extensión debido a que el área de contacto herramienta-material era muy reducido, especialmente en los ensayos con profundidad de mecanizado 0,15 mm. El desgaste de entalla y de astillamiento que apareció en los primeros instantes del ensayo y el desgaste de cráter progresaron moderadamente, siendo el tipo de desgaste dominante que marcó el final de vida el desgaste de flanco. El criterio de fin de vida por desgaste de flanco se estableció en un valor máximo de 0,4 mm. La Figura 35 muestra imágenes obtenidas mediante microscopio electrónico (SEM) correspondientes al final de la vida de dos herramientas PCBN (MB8025 y 7015). Aunque el desgaste de entalla y el de cráter se identifican fácilmente en las imágenes, la extensión de estos no es comparable con el principal mecanismo de desgaste que es el desgaste de flanco.

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

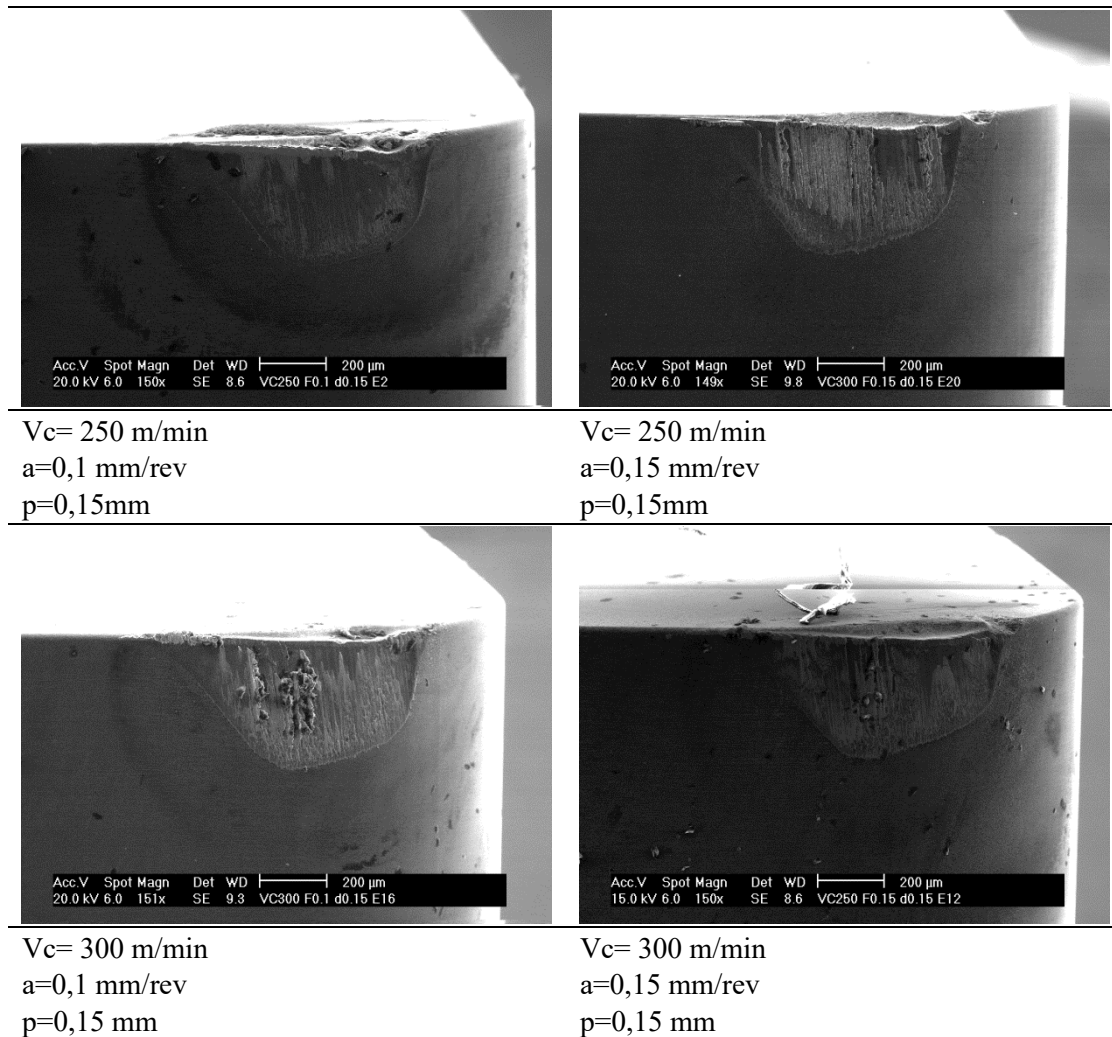


**Figura 35.** Imágenes del desgaste de las herramientas PCBN al final de vida (Microscopio SEM). a) Herramienta MB8025,  $V_c=250$  m/min,  $a=0,1$  mm/rev,  $p=0,15$  mm. b) Herramienta 7015,  $V_c=300$  m/min,  $a=0,1$  mm/rev,  $p=0,15$  mm

En la Figura 36 y Figura 37 se muestran imágenes de microscopía óptica correspondientes al estado de fin de vida de la herramienta PCBN 7015 para las cuatro condiciones de corte ensayadas. Se observa que para la menor velocidad de corte (250 m/min) el filo de corte está más dañado especialmente en la zona de la entalla. Esto es debido a las mayores fuerzas de mecanizado y mayor inestabilidad asociada a menores temperaturas en la zona de corte.



**Figura 36.** Imágenes del desgaste de la herramienta PCBN de Sandvik (7015) al final de vida (microscopio óptico): superficie de incidencia (imagen superior) y superficie de desprendimiento (imagen inferior).

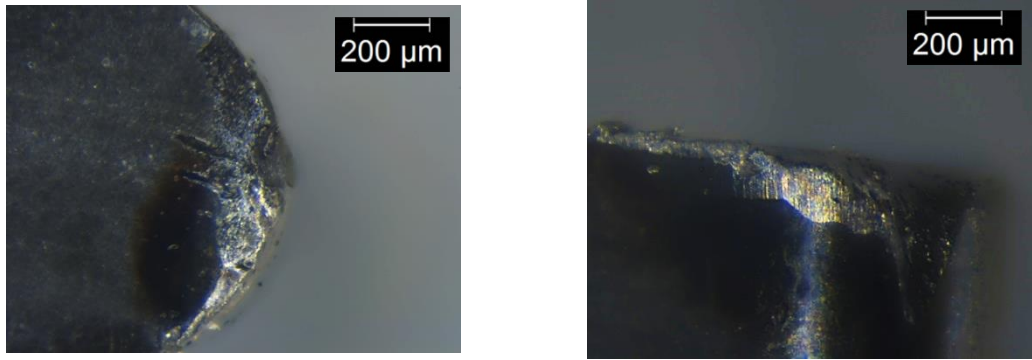


**Figura 37.** Imágenes del desgaste de la herramienta PCBN de Sandvik (7015) al final de vida (Microscopio SEM). Arriba superficie de incidencia, abajo superficie de desprendimiento

El avance no produjo cambios importantes en el tipo de desgaste en la herramienta. Mayores avances se relacionan con un área de contacto entre la herramienta y la pieza más grande y en consecuencia mayores áreas de cráter (ver Figura 37).

La herramienta PCBN de referencia (CBN170) también se ensayó a una velocidad de corte menor (200 m/min). En la Figura 38 se muestra la superficie de desprendimiento y de incidencia para la herramienta CBN170 correspondiente a fin de vida en el ensayo con  $V_c=200$  m/min,  $a=0,15$  mm/rev y  $p=0,25$  mm. Se observan los mismos tipos de desgaste que en los ensayos con mayores velocidades de corte, aunque debido a la mayor inestabilidad del corte, las roturas del filo son mayores, especialmente en la zona de entalla en los ensayos con elevada sección de viruta. Este fenómeno puede provocar una rotura prematura del filo de corte.

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional



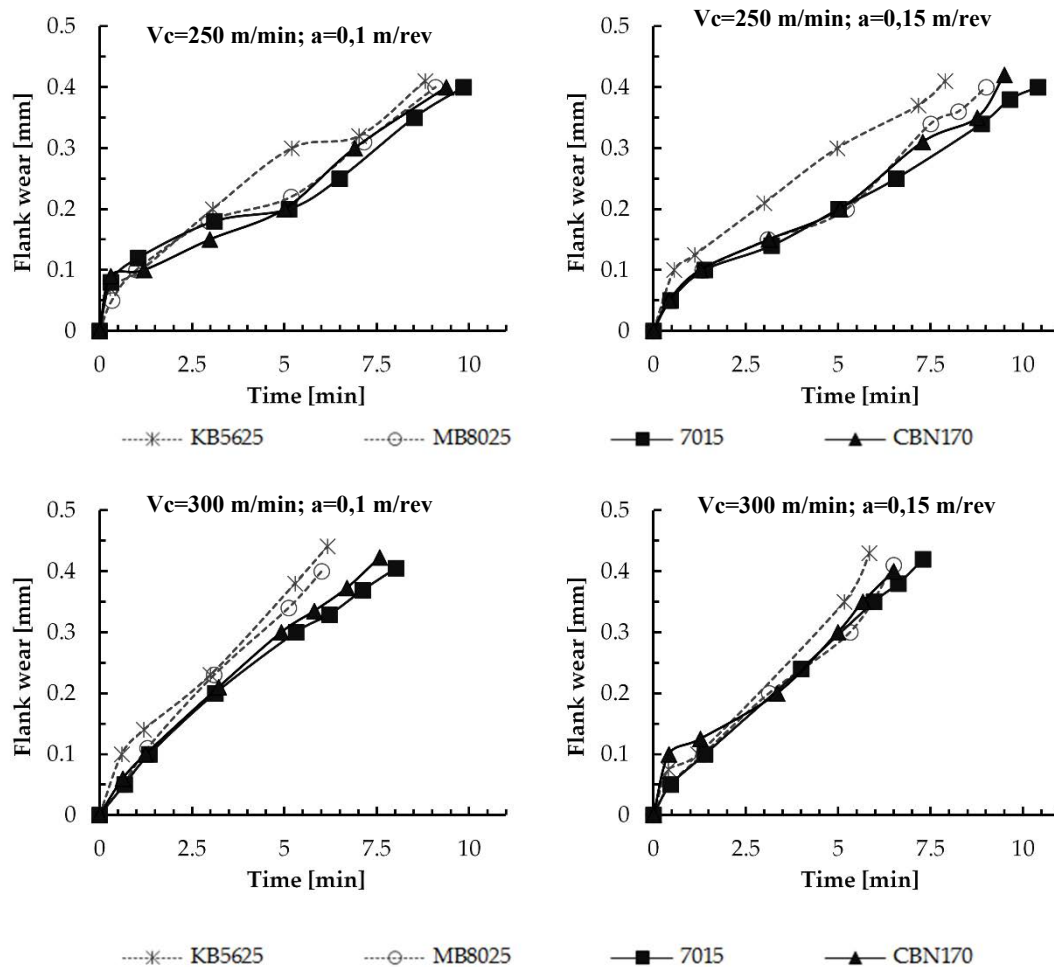
$V_c=200$  m/min,  $a=0,15$  mm/rev y  $p=0,25$  mm

**Figura 38.** Desgaste de la herramienta PCBN de Seco con microscopio óptico ( $V_c=200$  m/min,  $a=0,15$  mm/rev y  $p=0,25$  mm)

En los ensayos con herramienta PCBN se observó un cambio en la morfología de la viruta relacionado claramente con el estado de desgaste de la herramienta. En las primeras pasadas se obtuvieron virutas continuas con una longitud considerable y geometría helicoidal muy regular. Al aumentar el nivel de desgaste se redujo progresivamente la longitud de las virutas. Finalmente, al acercarse al final de vida de la herramienta, la viruta mostraba una geometría y forma irregular y mucho más segmentada. Por ello, la morfología de la viruta obtenida puede ser un buen indicador de cuándo la herramienta está cercana al final de vida.

En la Figura 39 presenta la evolución del tamaño del desgaste de flanco de todas las herramientas PCBN para las condiciones de velocidad de corte de 250 m/min y 300 m/min. Se observa que inicialmente se produce un mayor crecimiento del desgaste denominado acomodación del filo de corte. Posteriormente se pasa a una zona con crecimiento lineal más lento del desgaste de flanco hasta llegar al valor límite de 0,4 mm establecido como criterio de fin de vida.





**Figura 39.** Evolución del desgaste de flanco para las herramientas ensayadas.

### 2.5.2.3. Vida de la herramienta

A continuación se realiza un análisis comparativo de la vida útil de las herramientas de metal duro y PCBN para las diferentes condiciones de corte consideradas para analizar si son aplicables industrialmente y cuáles tienen un mejor comportamiento. El final de la vida se definió a partir del desgaste que apareció en la herramienta, en este caso, cuando el desgaste del flanco alcanzó el valor de 0,4 mm (herramientas PCBN), o cuando las roturas frágiles de la arista de corte provocaron la rotura catastrófica del mismo (herramientas de carburo).

Tal y como se describió en el apartado 2.4.2.3, además de la vida de filo en minutos, se analiza la superficie mecanizada por unidad de tiempo y por filo. En general, el rendimiento de las operaciones de mecanizado se cuantifica a partir del volumen mecanizado, sin embargo, en operaciones de acabado donde la profundidad de corte no es un parámetro relevante es más importante estudiar la superficie mecanizada. En la

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

Tabla 9 y Tabla 10 se indican los valores obtenidos para dichas magnitudes para los distintos ensayos realizados con herramientas de carburo y PCBN respectivamente.

La herramienta de metal duro (TS2000) de carburo permitió alcanzar vidas de filo muy superiores a las obtenidas con las herramientas PCBN. También se incrementó significativamente la vida de herramienta en relación con la obtenida en los ensayos en seco. En los ensayos con velocidad de corte 50 m/min (avances 0,1 y 0,15 mm/rev), la presencia de taladrina incremento la vida en más de un 300%. Esto fue debido a las menores temperaturas que originaron un desgaste más progresivo.

**Tabla 9.** Vida, superficie mecanizada por unidad de tiempo y por filo en los ensayos con herramientas de carburo TS2000.

Herramienta	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]	Vida [min]	Sup. mecanizada en tiempo [mm <sup>2</sup> /s]	Sup. mecanizada por filo [mm <sup>2</sup> /filo]
<b>Carburo</b> (TS2000, Seco)	50	0,1	0,25	43,9	83,3	2,19 e5
		0,15	0,25	24,9	125	1,86 e5
	70	0,1	0,25	25,2	166,7	1,77 e5
		0,15	0,25	14,7	175	1,55 e5

Las vidas de las herramientas PCBN en los ensayos con fluido de corte a presión convencional oscilan entre los 5 y los 15 minutos (muy superiores a las vidas obtenidas en los ensayos en seco). Al comparar la vida de estas herramientas PCBN con las de carburo se obtiene que es notablemente inferior. Sin embargo, si se compara la superficie mecanizada por filo se observa que mientras las herramientas PCBN alcanzan valores desde los 185.071 a los 421.000 mm<sup>2</sup>/filo las herramientas de carburo van desde los 154.808 a 219.371 mm<sup>2</sup>/filo. Es decir, las herramientas PCBN, para prácticamente todas las condiciones, permiten mecanizar mayores superficies de pieza por filo que las herramientas de metal duro.

Debido a que las velocidades de corte son muy superiores para las herramientas PCBN, también las superficies mecanizadas por unidad tiempo son muy superiores a las obtenidas con herramientas de metal duro. En concreto, en los ensayos con la máxima velocidad de corte (300 m/min) se obtuvieron superficies mecanizadas por unidad de tiempo entre 2,5 y 6 veces superiores para las herramientas PCBN. Para valorar la conveniencia de optar por una herramienta PCBN o de carburo en estos procesos también debe considerarse que las herramientas PCBN tiene un coste 10 veces superior.



**Tabla 10.** Vida, superficie mecanizada por unidad de tiempo y por filo de las diferentes herramientas PCBN para las condiciones de corte ensayadas.

Herramienta	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]	Vida [min]	Sup. mecanizada en tiempo [mm <sup>2</sup> /s]	Sup. mecanizada por filo [mm <sup>2</sup> /filo]
PCBN (CBN170, Seco)	200	0,1	0,15	14,8	333,3	2,95 e5
		0,15		14,1	500	4,21 e5
		0,1	0,25	13,6	333,3	2,71 e5
		0,15		5,0	500	1,51 e5
	250	0,1	0,15	9,4	416,7	2,34 e5
		0,15		9,5	625	3,56 e5
		0,1	0,25	10,2	416,7	2,56 e5
		0,15		9,3	625	3,50 e5
	300	0,1	0,15	7,6	500	2,27 e5
		0,15		6,5	750	2,93 e5
		0,1	0,25	6,4	500	1,93 e5
		0,15		6,8	750	3,05 e5
PCBN (MB8025, Mitsubishi)	250	0,1	0,15	9,1	416,7	2,27 e5
		0,15		9,0	625	3,38 e5
	300	0,1	0,15	6,0	500	1,80 e5
		0,15		6,5	750	2,92 e5
PCBN (KB5625, Kennametal)	250	0,1	0,15	8,8	416,7	2,20 e5
		0,15		7,9	625	2,96 e5
	300	0,1	0,15	6,2	500	1,85 e5
		0,15		5,8	750	2,63 e5
PCBN (7015, Sandvik)	250	0,1	0,15	9,8	416,7	2,46 e5
		0,15		10,4	625	3,90 e5
	300	0,1	0,15	8,0	500	2,41 e5
		0,15		7,3	750	3,28 e5

Se puede observar que a medida que se reduce la velocidad de corte dentro de los parámetros ensayados para las herramientas de carburo y PCBN se observa una mayor duración de la herramienta. El incremento del avance supuso una reducción de la vida de la herramienta de alrededor de 43 % para las herramientas de carburo, sin embargo, no se observó un efecto tan destacable para las herramientas PCBN.

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

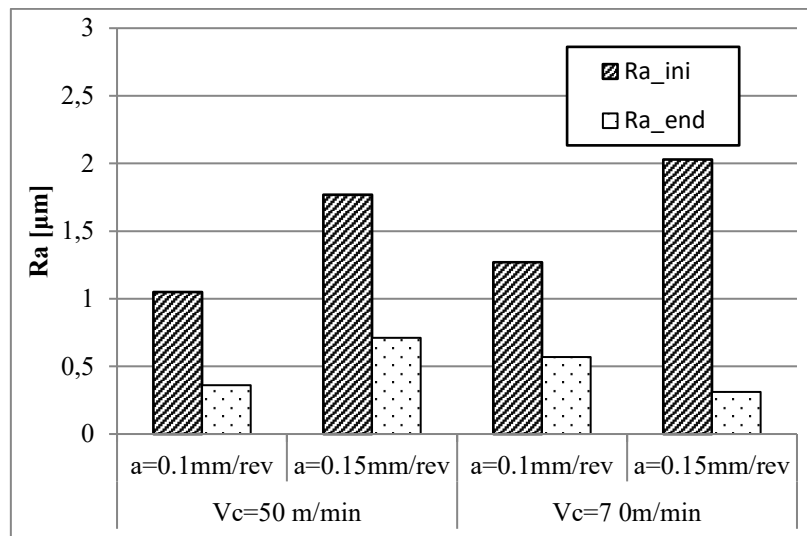
La herramienta PCBN que presentó los mejores resultados de vida fue la 7015, caracterizada por su afilado elíptico. Este tipo de preparación de filo combina una elevada tenacidad con un corte suave con mayor estabilidad y menores fuerzas de mecanizado. Asimismo, la herramienta 7015 presenta el menor contenido de CBN (50%), frente a contenidos de CBN del 60% para la MB8025 y del 65 % para la CBN170. El menor contenido en CBN se relaciona con una mayor tenacidad de las herramientas PCBN.

Para las herramientas PCBN, los mejores resultados de vida de herramienta y de superficie mecanizada por filo se obtuvieron para la menor velocidad de corte (200 m/min para la herramienta CBN170 y 250 m/min para las restantes herramientas PCBN), para la menor profundidad de pasada (0,15 mm) y para el avance más grande (0,15 mm/rev).

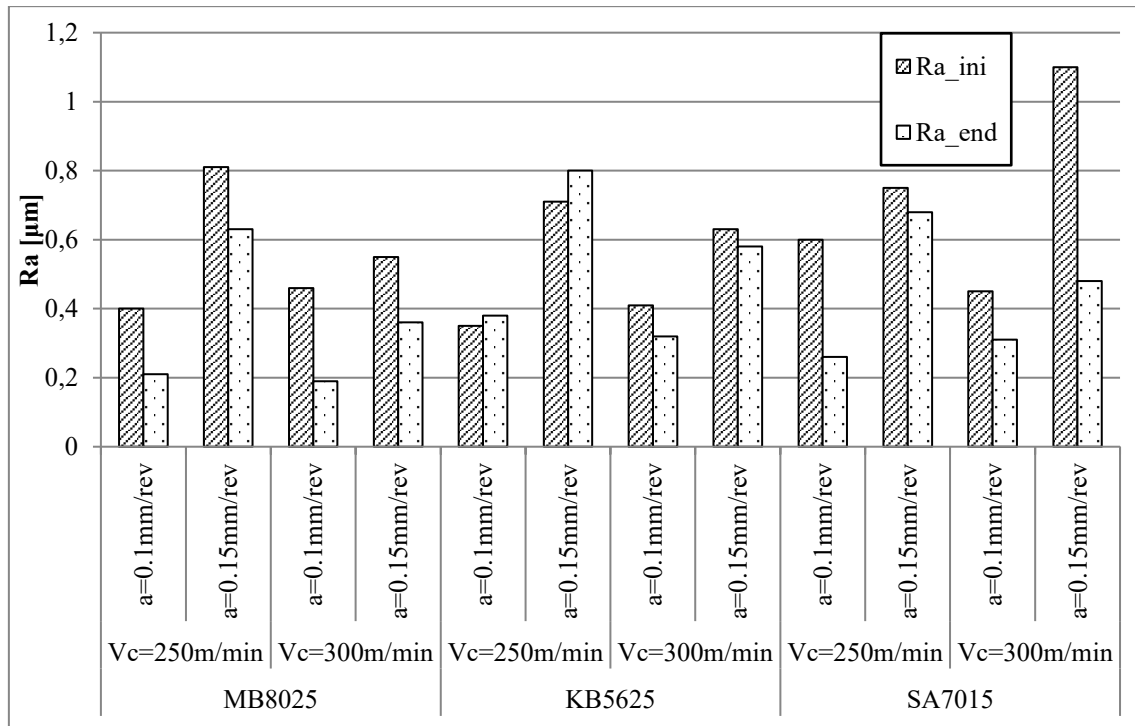
### 2.5.2.4. Rugosidad

La evolución de la rugosidad superficial, cuantificada a través de la rugosidad media aritmética,  $R_a$ , se controló realizando mediciones en tres zonas diferentes de la superficie mecanizada. Dichas repeticiones de medidas presentaron variaciones menores del 5 % tomándose la mayor de ellas como valor representativo de la rugosidad superficial. La Figura 40 muestra la rugosidad inicial y final obtenida en los ensayos con herramientas de carburo (TS2000), mientras que la Figura 41 y la Figura 42 muestran las rugosidades iniciales y finales para las herramientas PCBN (MB8025, 7015, KB5625 y CBN170).

A diferencia de lo observado en los ensayos en seco, en todos los ensayos con taladrina a presión convencional se obtuvieron rugosidades superficiales mayores al inicio de los ensayos (herramienta nueva) que cuando la herramienta se encontraba próxima a su fin de vida. En los ensayos con herramienta nueva de metal duro los valores de rugosidad fueron superiores a los obtenidos con herramientas PCBN alcanzándose valores de  $R_a$  superiores a 2  $\mu\text{m}$  para la velocidad de corte y avances máximos (70 m/min y 0,15 mm/rev respectivamente).

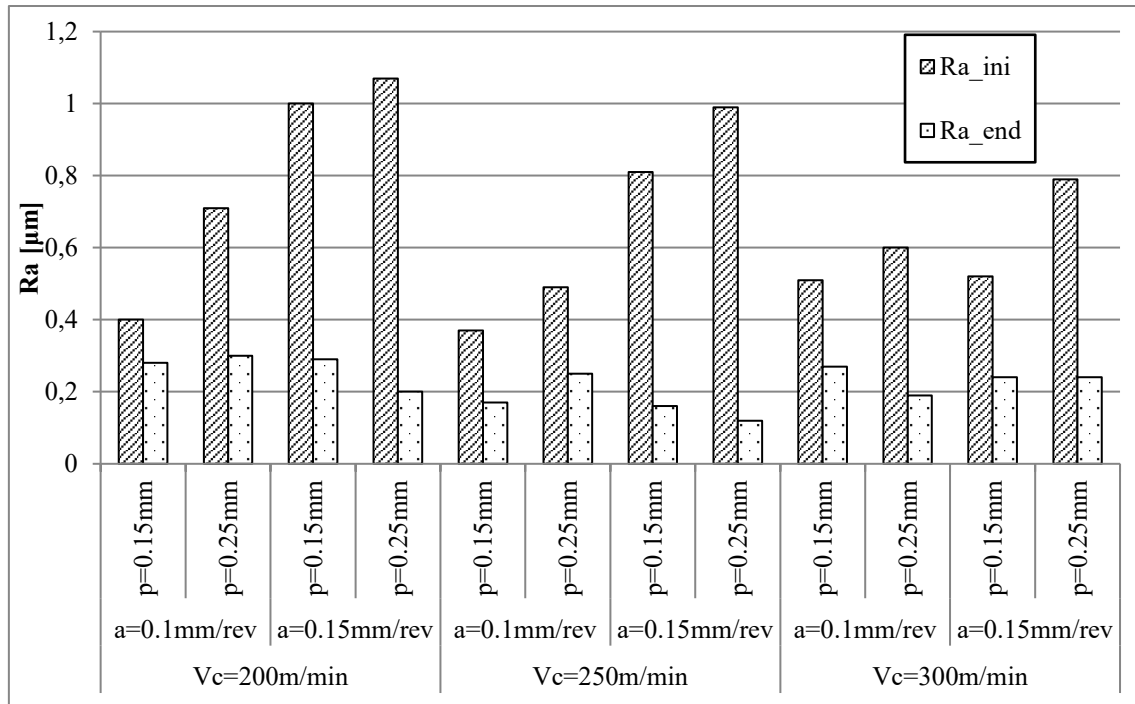


**Figura 40.** Rugosidad media aritmética inicial y final para las herramientas de carburo TS2000.



**Figura 41.** Rugosidad media aritmética inicial y final para todas las herramientas PCBN ensayadas a profundidad de 0,15 mm. Avance (mm/rev) y velocidad de corte (m/min)

## 2.5 Ensayos con fluido de corte a presión convencional

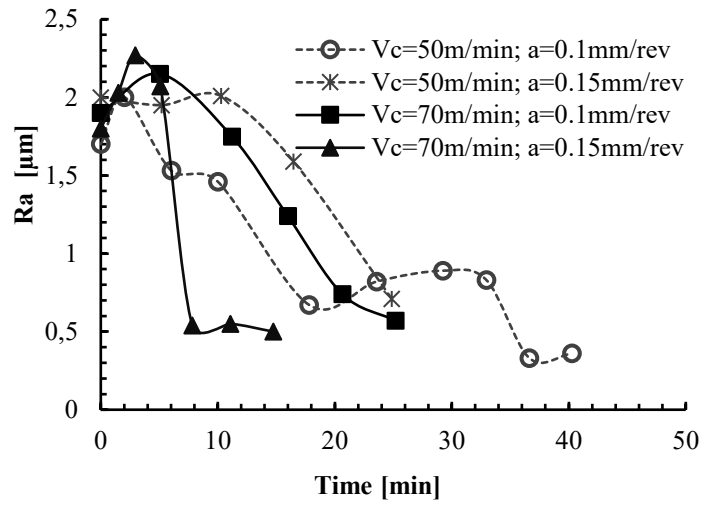


**Figura 42.** Rugosidad media aritmética inicial y final para la herramienta PCBN de seco (CBN170) a presión convencional. Avance (mm/rev) y profundidad (mm) y velocidad de corte (m/min).

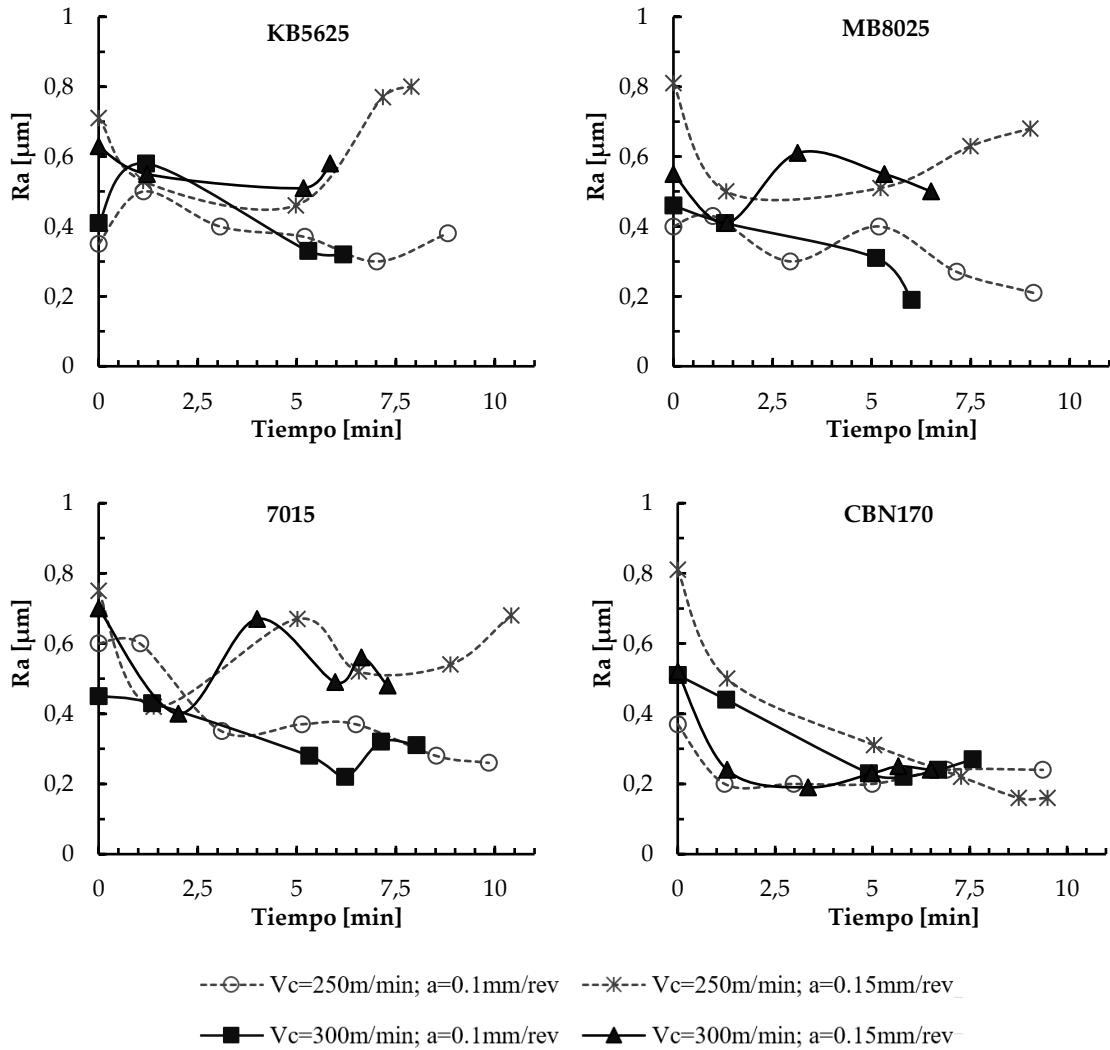
En la Figura 43 y Figura 44 se muestra la evolución de la rugosidad en función del tiempo, tanto para los ensayos con herramienta de carburo como para las herramientas PCBN.

Se observa que al aumentar el nivel de desgaste de la herramienta la rugosidad mejoró progresivamente obteniéndose acabados superficiales de gran calidad para desgastes cercanos al final de vida con valores de Ra entre 0,71 y 0,31  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento se relaciona con el tipo de desgaste observado que produce una modificación en la geometría del filo de forma que se incrementa el radio aparente de la herramienta, lo cual conlleva una reducción de la rugosidad teórica.

Debido a los menores valores de rugosidad iniciales y finales, se concluye que las herramientas PCBN tienen un mejor comportamiento en cuanto al acabado superficial obtenido. Destaca la herramienta PCBN de Seco con la que se obtuvieron valores de Ra entre 0,2 y 0,3  $\mu\text{m}$  a final de vida.



**Figura 43.** Evolución de la rugosidad media aritmética  $[\mu\text{m}]$  en herramientas de carburo TS2000.



**Figura 44.** Evolución de la rugosidad media aritmética  $[\mu\text{m}]$  en herramientas PCBN.

## 2.6. Ensayos con fluido de corte a alta presión

### 2.6.1. Condiciones de corte

El último grupo de ensayos realizado en operaciones de acabado en Inconel 718 fue con fluido de corte inducido a alta presión (70 bares). Como se indicó en el Estado del Arte de este documento, este tipo de refrigeración ha dado mejores resultados que la refrigeración a presión convencional en las operaciones de acabado con herramientas de metal duro, por lo que se consideró de interés verificar su influencia en los procesos con herramientas PCBN. Los ensayos a alta presión se realizaron únicamente con la herramienta PCBN del fabricante Seco (CBN170) considerada de referencia por ser la única específicamente recomendada para el acabado de Inconel 718. Por otra parte, esta herramienta ha mostrado buenos resultados en cuanto a vida y rugosidad en los ensayos realizados con refrigeración a presión convencional. En la Tabla 11 se pueden observar los parámetros de corte seleccionados, que son los mismos que se consideraron para los ensayos realizados con fluido de corte a presión convencional.

**Tabla 11.** Condiciones de corte para los ensayos realizado con la herramienta PCBN CBN170 con refrigeración a alta presión (70 bares).

Material de corte (designación y fabricante)	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]
PCBN (CBN170, SECO)	200 / 250 / 300	0,1 / 0,15	0,15 / 0,25

Como se ha dicho anteriormente (apartado 2.3.2) el fluido de corte se introdujo en dos direcciones, en la superficie de desprendimiento en el área de corte para facilitar la rotura de la viruta y mejorar el comportamiento tribológico del mecanizado, y en la superficie de incidencia para mejorar la refrigeración de la zona de mecanizado en general y en concreto de la superficie mecanizada.

### 2.6.2. Resultados

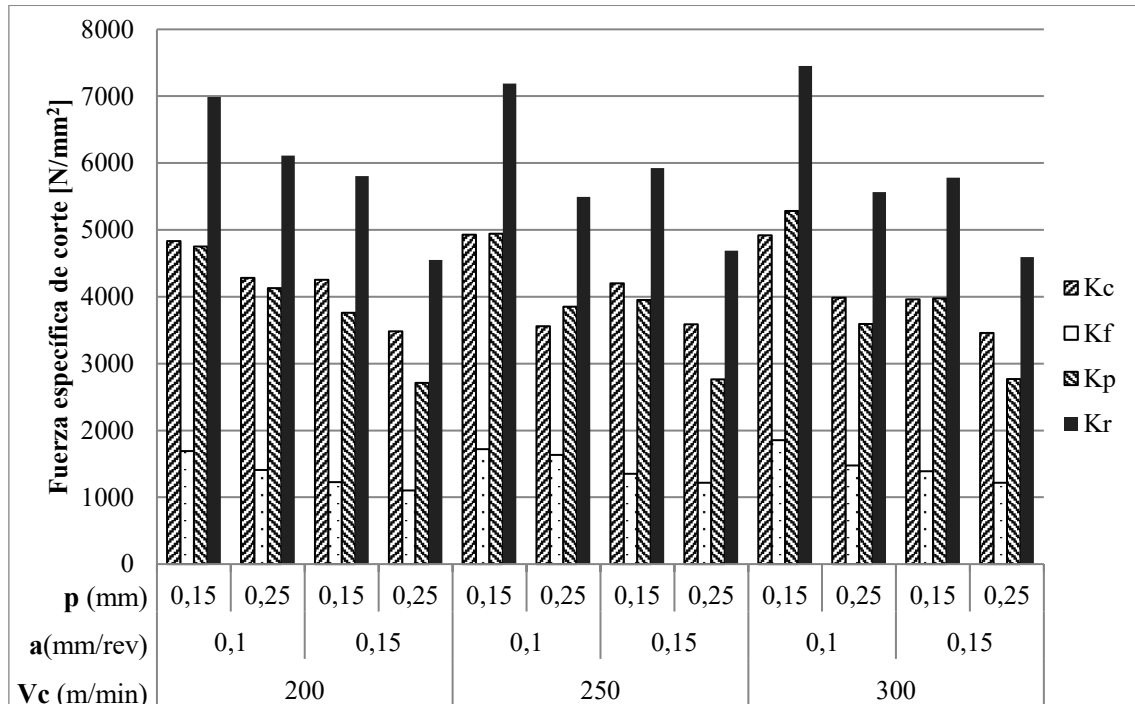
#### 2.6.2.1. Fuerza de corte

Al igual que para los ensayos en seco y con refrigeración a presión convencional, a continuación, se analizarán las componentes y la resultante de las fuerzas específicas de mecanizado ( $K_c$ ,  $K_f$ ,  $K_p$  y  $K_r$ ). En la Figura 45 se muestran los valores iniciales (con herramienta sin desgaste) obtenidos para las diferentes condiciones de corte ensayadas. Las fuerzas específicas resultantes presentaron valores de entre 4000 y 8500 N/mm<sup>2</sup>.

Al igual que en los ensayos descritos anteriormente, la reducción de la profundidad de pasada o la reducción del avance, provocó un incremento de las fuerzas específicas de mecanizado. Las variaciones fueron de entre el 20 % y el 25 % cuando se pasó de la profundidad de pasada 0,25 mm a 0,15 mm. Esto se debe a que la reducción de la

sección de viruta no deformada incrementa el efecto del endurecimiento por deformación del material mecanizado. La velocidad de corte no tuvo un efecto significativo y repetitivo en las fuerzas específicas de mecanizado con herramienta sin desgaste.

Las fuerzas específicas obtenidas para herramienta sin desgaste con fluido de corte a alta presión fueron similares, aunque en general ligeramente inferiores, a las obtenidas con presión convencional. Este efecto se relaciona principalmente con las mejores condiciones tribológicas debidas a la inyección del fluido de corte a alta presión.

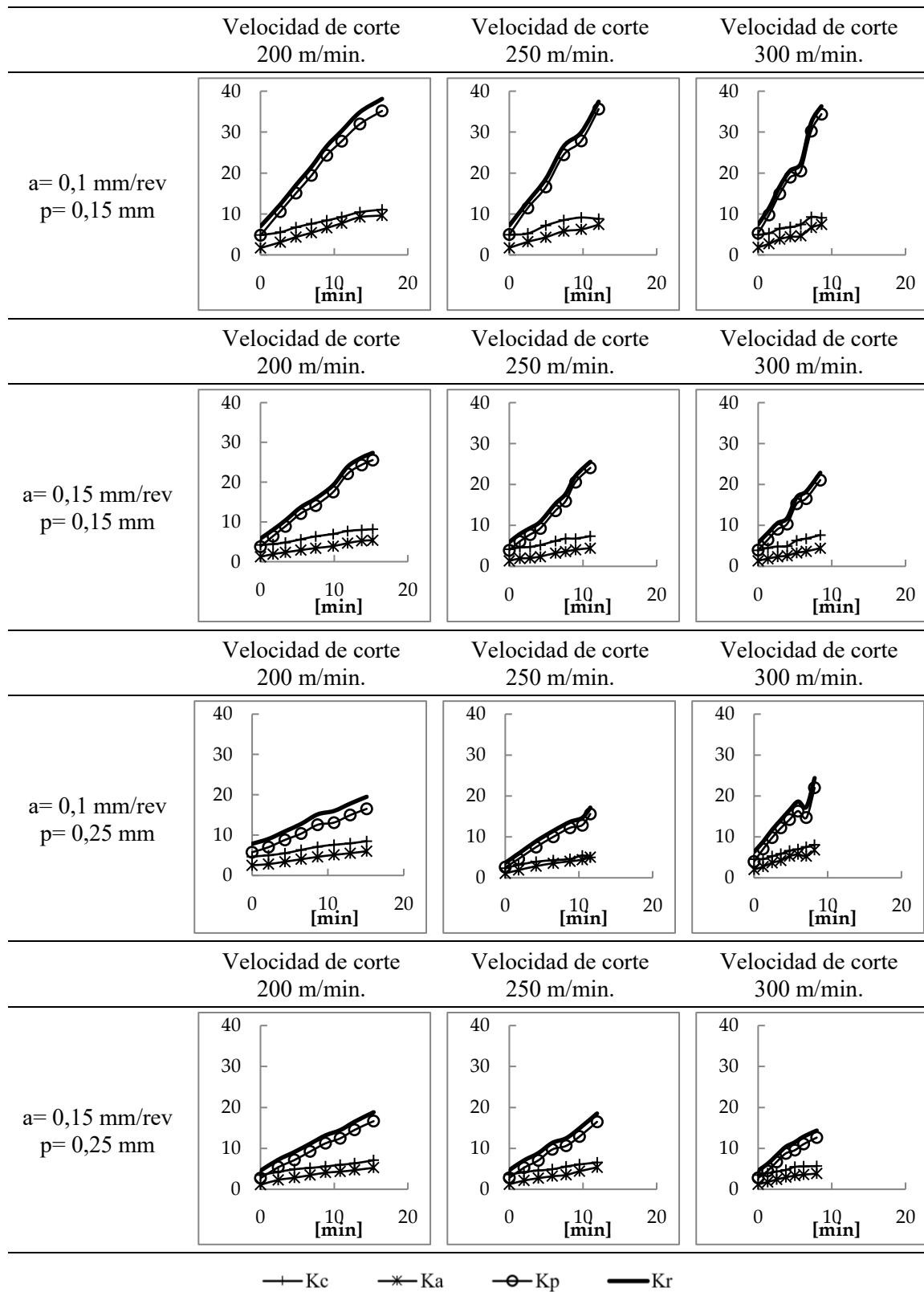


**Figura 45.** Componentes y resultante de la fuerza específica inicial para la herramienta PCBN de Seco (CBN170) con fluido de corte a alta presión.

En la Figura 46 se muestra la evolución de las fuerzas específicas de mecanizado con el tiempo de corte y por tanto con el nivel de desgaste de la herramienta. Las tendencias son similares a las observadas en los ensayos con fluido de corte a presión convencional, con un crecimiento lineal y progresivo de las fuerzas específicas con el tiempo de corte debido al desgaste de la herramienta. La componente Kp crece con mayor pendiente debido a que el desgaste principal en estas herramientas es el desgaste de flanco que se relaciona con un empuje sobre la herramienta debido a la recuperación elástica del material que fluye bajo el filo.

Al igual que ocurría en los ensayos con fluido a presión convencional, con la profundidad de pasada máxima (0,25 mm) y velocidad de corte mínima (200 m/min) aumenta la inestabilidad del corte y los valores de fuerzas, incrementándose el desgaste de entalla. En algunos casos esta inestabilidad puede causar el final de vida prematuro de la herramienta.

## 2.6 Ensayos con fluido de corte a alta presión



**Figura 46.** Evolución de las componentes de la fuerza específica de mecanizado [ $\text{kN/mm}^2$ ] para las herramientas de Seco (CBN170) en condiciones de fluido de corte a alta presión (70 bar).



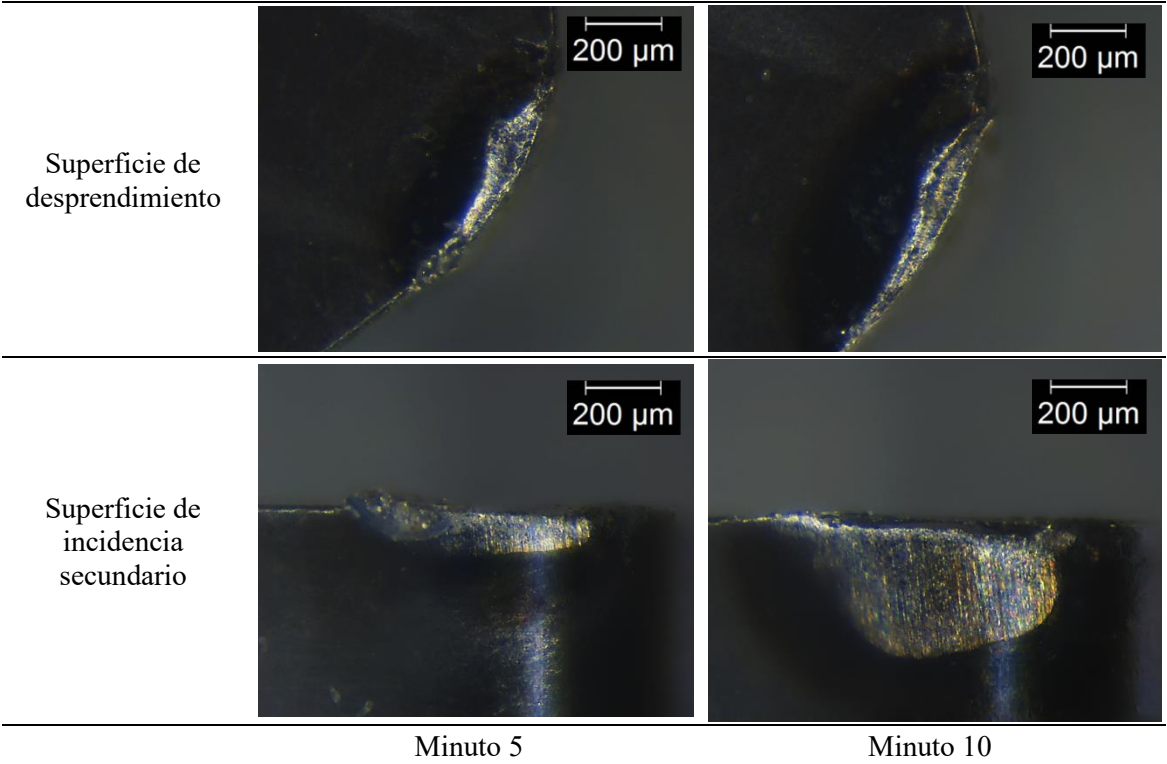
### 2.6.2.2. Desgaste

El desgaste de la herramienta presentó una evolución muy similar en todas las condiciones de corte ensayadas con refrigeración a alta presión y a su vez, similares al desgaste observado en los ensayos con refrigeración a presión convencional que se detallaron en el apartado 2.5.2.2. No obstante, el desgaste al emplear refrigeración a alta presión presentó un comportamiento más progresivo y con menos roturas frágiles del filo que con presión convencional, alcanzándose vidas de herramienta significativamente superiores.

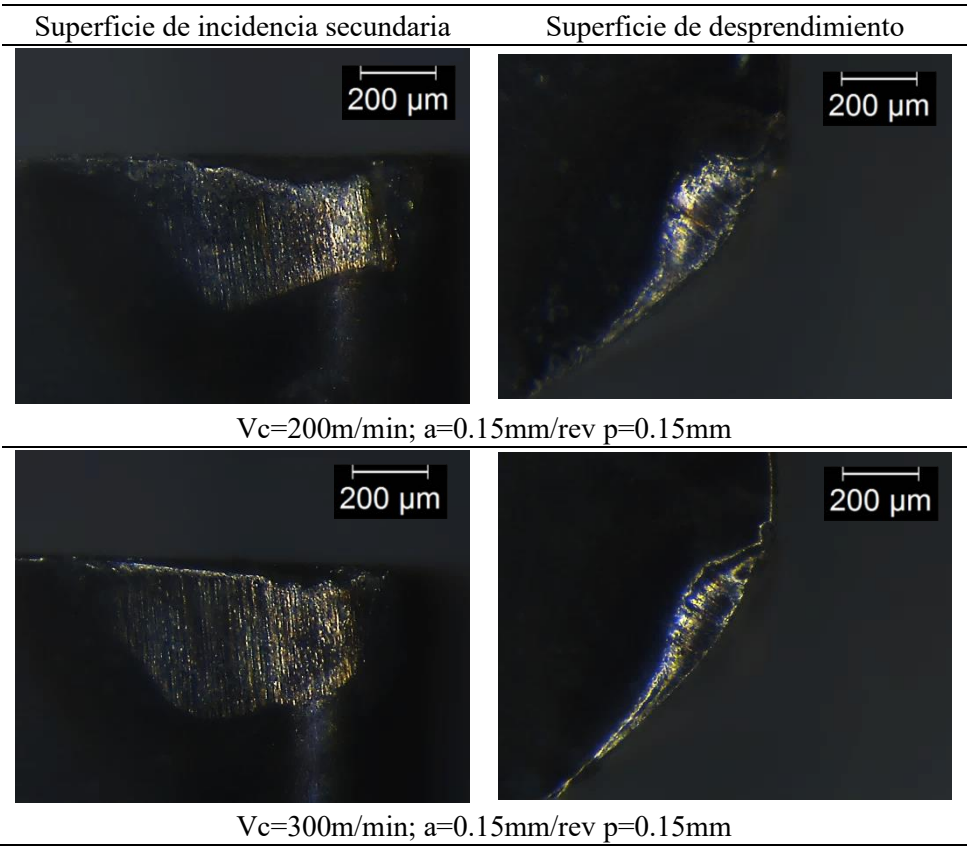
En todas las condiciones de corte ensayadas, en los primeros instantes del mecanizado se observó un desgaste muy leve de flanco, algo de material adherido y pequeñas roturas frágiles del filo de corte generalmente en la zona de la entalla. Durante el primer minuto de los ensayos, la amplitud de estos desgastes se mantenía en valores inferiores a los 50  $\mu\text{m}$ . Estos desgastes progresaban moderadamente al aumentar el tiempo de corte, en especial el desgaste de flanco en la zona de la punta de la herramienta. Para tiempos de corte medios se observó la formación de desgaste de cráter de tamaño reducido. En todos los ensayos a alta presión, el tipo de desgaste dominante fue el desgaste de flanco, alcanzándose el fin de vida cuando el tamaño del mismo llegaba al valor 0,4 mm establecido como criterio de sustitución de herramienta. En la Figura 47 se muestran imágenes obtenidas mediante microscopía óptica correspondientes al desgaste de herramienta para los tiempos de corte de 5 y 10 minutos en el ensayo con velocidad de corte de 250 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,25 mm. Se puede apreciar la progresión del desgaste de flanco y la aparición de un pequeño cráter en la superficie de desprendimiento.

En la Figura 48 se muestran imágenes correspondientes al estado de fin de vida en los ensayos con velocidad de corte 200 y 300 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,15 mm. El incremento de la velocidad de corte aumenta la progresión de los desgastes de tipo abrasivo, y en consecuencia del flanco, mientras que a la velocidad de corte 200 m/min se observa un mayor deterioro del filo por roturas frágiles especialmente en la zona de la entalla.

2.6 Ensayos con fluido de corte a alta presión



**Figura 47.** Evolución del desgaste con taladrina a alta presión y condiciones de corte de velocidad de 250 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,25 mm.



**Figura 48.** Desgaste a final de vida con taladrina a alta presión y condiciones de corte de velocidad de corte de 200 y 300 m/min, avance de 0,1 mm/rev y profundidad de 0,15 mm.

### 2.6.2.3. Vida de la herramienta

Como se ha indicado en el apartado anterior, en términos generales, la refrigeración mediante fluido de corte a alta presión mejoró el comportamiento frente al desgaste en relación con la refrigeración a presión convencional. Esto se debe a una mejor evolución del desgaste y una mejor disipación calorífica en el área de corte, además de una mejor lubricación y extracción de la viruta generada. En la Tabla 12 se muestra los resultados de vida de herramienta, superficie mecanizada por filo y superficie mecanizada por unidad de tiempo obtenidos en los ensayos con fluido de corte a alta presión.

La influencia de los parámetros de corte sobre la vida de la herramienta también fue análoga a la observada en los ensayos con refrigeración a presión convencional. La reducción de la velocidad de corte aumentó la vida considerablemente, por ejemplo, al reducir la velocidad de 300 a 200 m/min prácticamente se duplicó la vida de la herramienta. El avance y la profundidad de pasada afectaron en menor medida a la duración de la herramienta obteniéndose incrementos de vida de en torno al 10 % al reducir dichos parámetros. Como se indicó en el apartado anterior, este efecto se debe a que la reducción de la sección de viruta reduce las fuerzas de mecanizado e incrementa la estabilidad del corte.

**Tabla 12.** Vida, superficie mecanizada en tiempo y por filo de la herramienta PCBN CBN 170 para las condiciones de corte ensayadas con taladrina a alta presión.

Herramienta	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]	Vida [min]	Sup. mecanizada en tiempo [mm <sup>2</sup> /s]	Sup. mecanizada por filo [mm <sup>2</sup> /filo]
PCBN (CBN170, SECO)	200	0,1	0,15	16,5	333,3	3,30 e5
		0,15		15,2	500	4,57 e5
		0,1	0,25	15,1	333,3	3,02 e5
		0,15		15,4	500	4,61 e5
		0,1	0,15	12,1	416,7	3,03 e5
		0,15		11,0	625	4,12 e5
		0,1	0,25	11,5	416,7	2,89 e5
		0,15		11,9	625	4,46 e5
	300	0,1	0,15	8,6	500	2,58 e5
		0,15		8,4	750	3,79 e5
		0,1	0,25	8,2	500	2,47 e5
		0,15		8,0	750	3,58 e5

Un hecho remarcable es que, tanto con presión convencional, como a alta presión, en los ensayos con la velocidad de corte mínima (200 m/min) y reducida sección de viruta (avance y/o profundidad de pasada reducida) se observó una mayor inestabilidad en el

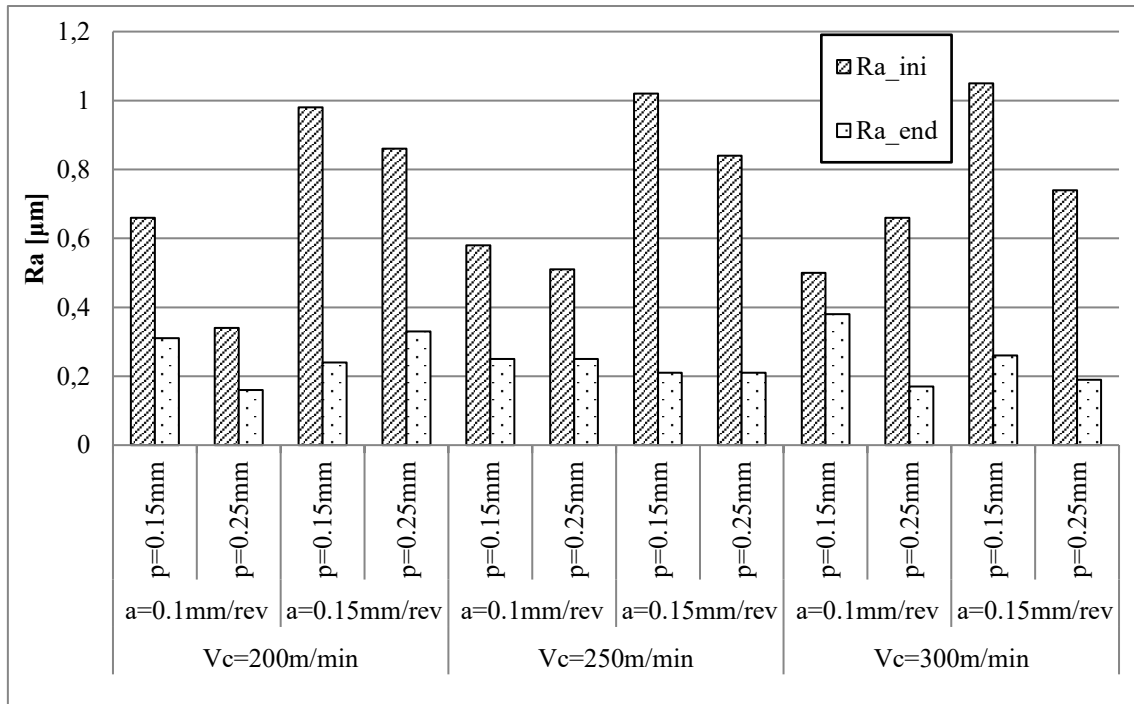
## 2.6 Ensayos con fluido de corte a alta presión

corte y por ello la aparición de roturas frágiles, especialmente en la zona de la entalla. Estos fenómenos pueden provocar la rotura prematura de la herramienta por lo que deberían evitarse estas condiciones de corte para la aplicación de herramientas PCBN en operaciones de acabado de Inconel 718.

En general, la aplicación de refrigeración a alta presión supuso un incremento en todas las condiciones de corte de entre uno y dos minutos. El incremento de vida relativo fue mayor para las velocidades de corte superiores alcanzándose aumentos de hasta un 33 %.

### 2.6.2.4. Rugosidad

La evolución de la rugosidad superficial, cuantificada a través de la rugosidad media aritmética,  $R_a$ , se controló realizando mediciones en tres zonas diferentes de la superficie mecanizada. Dichas repeticiones de medidas presentaron variaciones menores del 5% tomándose la mayor de ellas como valor representativo de la rugosidad superficial. Las herramientas CBN170 en mecanizado con refrigeración a alta presión tuvieron un buen comportamiento en términos de rugosidad durante prácticamente toda su duración. En la Figura 49 se muestra la rugosidad inicial y final obtenida para los distintos ensayos realizados. Al igual que en los ensayos con refrigeración a presión convencional, a alta presión se obtuvieron rugosidades superficiales mayores al inicio de los ensayos (herramienta nueva) que cuando la herramienta se encontraba próxima a su fin de vida. No se observan diferencias claras entre los resultados con refrigeración a presión convencional y a alta presión. La velocidad de corte no tuvo una influencia relevante en el acabado superficial. La reducción del avance y el incremento de la profundidad de pasada mejoró ligeramente los acabados superficiales obtenidos en los instantes iniciales de los ensayos.

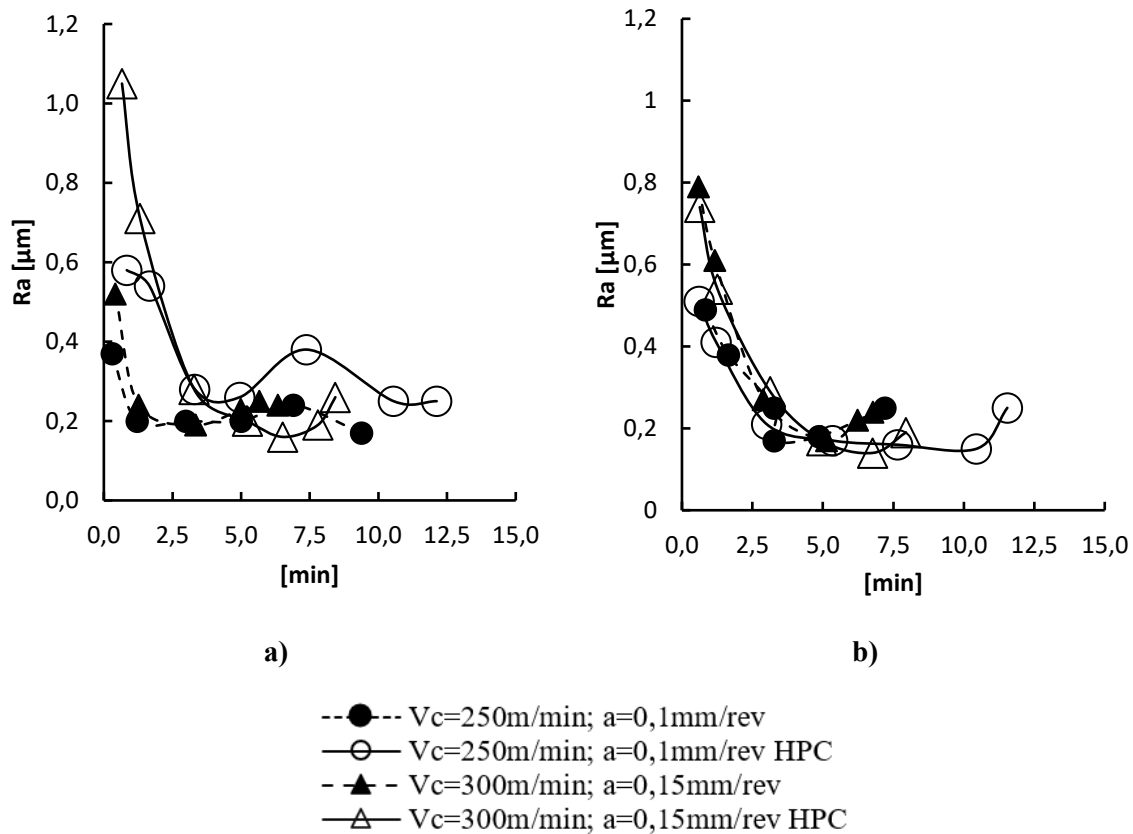


**Figura 49.** Rugosidad media aritmética inicial y final para la herramienta PCBN de seco (CBN170) a alta presión. Avance (mm/rev) y profundidad (mm) y velocidad de corte (m/min).

En la Figura 50 se muestra la evolución de la rugosidad en función del tiempo para los ensayos con refrigeración a alta presión. Se observa que al aumentar el nivel de desgaste de la herramienta la rugosidad mejoró rápidamente obteniéndose acabados superficiales de gran calidad a partir del minuto 1 ó 2 de los ensayos, que se mantenían prácticamente constantes hasta el fin de vida de la herramienta. Este comportamiento se relaciona con el tipo de desgaste observado que produce una modificación en la geometría del filo de forma que se incrementa el radio aparente de la herramienta, lo cual conlleva una reducción de la rugosidad teórica.

No se observaron diferencias significativas de los resultados de rugosidad al modificar los parámetros de corte.

## 2.7 Conclusiones



**Figura 50.** Comparativa de la evolución de la rugosidad media aritmética [ $\mu\text{m}$ ] en herramienta CBN170 a presión convencional y alta presión (HPC). a) Profundidad de 0,15 mm, b) profundidad de 0,25 mm.

## 2.7. Conclusiones

En este apartado se muestran las principales conclusiones obtenidas experimentalmente en relación con el mecanizado de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN, así como las principales aportaciones del trabajo realizado.

- Se ha confirmado la viabilidad de mecanizar Inconel 718 con herramientas de metal duro en seco. Sin embargo, las vidas de herramienta en todos los ensayos realizados con las distintas herramientas PCBN consideradas fueron muy reducidas (entre 0,2 a 1,2 minutos) que harían imposible su aplicación en procesos industriales. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- En las operaciones de acabado en seco de Inconel 718 con herramientas PCBN se observó una relevante inestabilidad en el corte por lo que fueron predominantes los mecanismos de desgaste relacionados con la fragilidad de la herramienta, principalmente el desgaste de entalla. La reducción de la profundidad de corte mejoró el comportamiento de las herramientas.
- En los ensayos con herramienta PCBN con fluido de corte a presión convencional y a alta presión el desgaste dominante fue de tipo abrasivo (desgaste de flanco). También se observaron otros tipos de desgaste como

- astillado de filo, entalla y adhesión de material, pero con una progresión más lenta.
- La utilización de refrigeración incrementó notablemente la vida de herramienta de las herramientas PCBN obteniéndose duraciones de en torno a 10 minutos para velocidades de corte de 300 m/min, muy superiores a las empleadas en los procesos convencionales de acabado con herramientas de carburo. Se confirma por tanto la viabilidad de aplicar de emplear herramientas PCBN en procesos de acabado de Inconel 718. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
  - En los ensayos con herramientas de metal duro con fluido de corte se obtuvieron vidas de herramienta más elevadas que en los ensayos con herramienta PCBN. Sin embargo, en los procesos con herramienta PCBN se emplean velocidades de corte muy superiores por lo que se consiguen mayores superficies mecanizadas por filo y mayores superficies mecanizadas por unidad de tiempo. Para determinar el interés de emplear herramientas PCBN en lugar de herramientas de metal duro también se ha de tener en cuenta que las herramientas PCBN tienen un coste de filo unas 10 veces superior al de las herramientas de carburo.
  - La aplicación de fluido de corte a elevada presión (70 bares) aumenta la duración de la herramienta hasta un 30% en relación con la obtenida con fluido de corte a presión convencional (7,5 bares). Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
  - De las 4 herramientas PCBN comerciales ensayadas, los mejores resultados se obtuvieron para la herramienta con designación 7015 (Sandvik). Se trata de una herramienta con preparación del filo elíptica por lo que combina una elevada tenacidad (debida al efecto del radio mayor) con un corte suave con mayor estabilidad y menores fuerzas de mecanizado (debido al efecto del radio menor). Se concluye que la microgeometría de la arista de corte tiene una influencia relevante en el comportamiento de la herramienta en este tipo de procesos. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
  - Tanto en los procesos de acabado con herramienta PCBN a presión convencional, como a alta presión, en los ensayos con la velocidad de corte mínima (200m/min) y elevada sección de viruta (avance y/o profundidad de pasada elevada) se observó una mayor inestabilidad en el corte y por ello la aparición de roturas frágiles, especialmente en la zona de la entalla. Estos fenómenos pueden provocar la rotura prematura de la herramienta por lo que deberían evitarse estas condiciones de corte para la aplicación de herramientas PCBN en operaciones de acabado de Inconel 718.
  - En las operaciones de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN empleando fluido de corte se obtuvieron buenos acabados superficiales con valores de rugosidad con menor variabilidad que los obtenidos con herramientas de carburo. La rugosidad superficial es un parámetro relacionado con la integridad superficial del componente y por tanto de gran relevancia en procesos de fabricación de componentes de elevada responsabilidad. El efecto del fluido

## 2.7 Conclusiones

de corte a alta presión no supuso una mejora en la rugosidad superficial en relación con la refrigeración a presión convencional.



## CAPÍTULO 3

### MODELADO NUMÉRICO

---

#### 3.1. Introducción

En este capítulo se describe el modelo numérico realizado en la presente tesis mediante el software comercial de elementos finitos DEFORM 2D para analizar el mecanizado en operaciones de acabado del material Inconel 718 con herramientas PCBN.

La modelización numérica es una aproximación al estudio de procesos de mecanizado cuyo uso se ha visto incrementado debido a la posibilidad de obtener resultados que mediante métodos experimentales tendrían una elevada complejidad y coste. Otra ventaja muy significativa de los modelos numéricos es la posibilidad de ahorrar tiempos en el desarrollo de nuevas herramientas.

Normalmente, el modelado mediante elementos finitos de un problema de mecanizado se realiza en el campo bidimensional o tridimensional. El modelado 3D permite la simulación de procesos de elevada complejidad permitiendo además la obtención de diferentes magnitudes en los tres ejes espaciales (campo tensional, deformaciones, temperaturas...), sin embargo, el elevado coste computacional de estos modelos hace que el modelo 2D sea una metodología ampliamente usada cuando la complejidad del problema a estudiar lo permite. En los casos en los que es posible, en la actualidad y

### 3.2 Conceptos básicos del modelo de elementos finitos

más aún en el pasado, la simplificación de un proceso de mecanizado a un modelo 2D se realiza y se ha realizado debido al gran ahorro de coste computacional unido a la capacidad de trabajar con una malla con elementos de menor tamaño, lo cual permite conseguir modelos con una mayor resolución.

Los modelos 2D son capaces de representar adecuadamente los procesos de mecanizado por arranque de material, sin embargo, conseguir realizar un modelo capaz de predecir resultados reales con garantías es un problema de gran complejidad. Por ello, para realizar un modelo 2D que represente la realidad se ha de tener un conocimiento profundo de la física del problema, así como debe cumplir determinadas características que hagan posible dicha simplificación.

El objetivo de la realización del modelo dentro del presente trabajo es el de tener un estudio numérico que permita analizar el comportamiento de las herramientas PCBN en el mecanizado de Inconel 718. Estas nuevas herramientas de corte permiten alcanzar velocidades superiores a las que alcanzan típicamente herramientas de carburo, aprovechándose del ablandamiento del material a mecanizar, siendo los esfuerzos térmicos que tienen que soportar mayores. En la actualidad, y debido a la generación de nuevos afilados, se está estudiando su uso para aplicaciones de acabado de superaleaciones. Es por ello, que resulta de gran interés, el analizar el efecto del afilado de la herramienta en variables clave relativas a la integridad de herramienta y pieza.

La estructura de este capítulo se divide en varios apartados, comenzando en este apartado con la introducción.

En el apartado segundo y tercero del presente capítulo de modelización numérica se exponen los conceptos básicos y el estado del arte de los modelos numéricos en procesos de mecanizado de Inconel 718, prestando especial atención a los realizados en 2D.

En el cuarto apartado se detallará el desarrollo del modelo numérico realizado en esta tesis. Se explicará el procedimiento seguido para definir el modelo: la geometría de la herramienta y la pieza, las propiedades del Inconel 718 y herramientas PCBN, las condiciones de contorno, interacciones y mallado.

En el quinto apartado se explicará la validación del modelo por medio de las fuerzas experimentales obtenidas en condiciones análogas a las simuladas (corte ortogonal).

En el sexto apartado se expondrán los resultados más significativos derivados del modelo numérico. Se analizarán fuerzas de corte, longitud de contacto, zona de estancamiento, temperatura en pieza de trabajo y herramienta.

En el último apartado se muestran las principales conclusiones obtenidas del modelo desarrollado se detallarán.

### **3.2. Conceptos básicos del modelo de elementos finitos**

Los procesos de mecanizado por arranque de material son una de las operaciones más comunes en la fabricación de componentes y no por ello dejan de tener una gran

complejidad debido a su naturaleza dinámica, donde se tiene que tener en cuenta fenómenos termo-mecánicos acoplados [77]. Este es uno de los motivos por el cual los modelos numéricos termo-mecánicos han cobrado una gran importancia en las últimas décadas, permitiendo conocer variables de difícil medición como son la distribución de temperaturas y tensiones residuales en la pieza final. Además de poder predecir fuerzas de corte, o posibles desgaste debido a los esfuerzos que sufre la herramienta [78].

Sin embargo, la realización de estos modelos es de gran complejidad, uno de los motivos en los que radica la complejidad de los modelos numéricos es la necesidad de reproducir el comportamiento del material sometido a grandes velocidades de deformación y gradientes térmicos (incluso a bajas velocidades de corte). Estas elevadas velocidades de deformación y gradientes térmicos se producen en zonas muy pequeñas cercanas al filo de corte de la herramienta, dificultando la selección adecuada de las condiciones de contorno en el problema [79]. El método de los elementos finitos se basa en la sustitución del continuo físico por elementos finitos que conforman una malla. Los elementos discretos poseen una geometría sencilla que hace más fácil el trabajar con ellos, además cada elemento contiene nodos en los que se aplica las condiciones de contorno y frontera. En estos nodos las variables de los problemas son calculadas mediante interpolación o derivadas. Estas variables se ensamblan entre nodos y elementos generando una relación global en el modelo. Por ello, el principal concepto es la discretización del dominio en elementos simplificados donde se pueda obtener una solución parcial e integrarla en una solución global.

Existen dos tipos de estrategias de tiempo de integración para este tipo de problemas, implícitos y explícitos. El método implícito se realiza resolviendo las ecuaciones de elementos finitos mediante iteraciones hasta que se satisfaga un criterio de convergencia para cada incremento. En este método la duración del paso de tiempo se impone según precisión, además el estado del modelo en el tiempo  $(t + \Delta t)$  se determina en el tiempo  $(t + \Delta t)$ . El método explícito determina la solución del conjunto mediante una regla de diferencias centradas para integrar las ecuaciones de movimiento de campo. En este método explícito se resuelven las ecuaciones para  $(t + \Delta t)$  basadas en el tiempo  $t$ . A día de hoy existen modelos numéricos en procesos de mecanizado tanto explícitos como implícitos [80].

Existen varios tipos de formulaciones numéricas usadas en el análisis de mecanizado de metales mediante el método de los elementos finitos: lagrangiano y euleriano. En el método lagrangiano el material se encuentra unido a la malla de elementos, esto implica que el material es deformado junto a la malla. De esta manera en modelos de mecanizado, la viruta se genera por la deformación provocada por la herramienta de corte al contactar con el material. Al no tener restricciones el material la viruta puede ser estable o segmentada en función del proceso de mecanizado. Una de las desventajas de la formulación lagrangiana es que las elevadas deformaciones producen distorsiones de los elementos de la malla debido a las deformaciones plásticas originadas, lo cual dificulta la convergencia de los resultados y por lo tanto los tiempos de simulación.

### 3.3 Estado del arte en modelos numéricos de mecanizado

En el método euleriano la malla está fijada en el espacio y el material fluye a través de la malla. En este análisis, se debe conocer la forma de la viruta, ángulo de cizalladura y condiciones de contacto. Las deformaciones se obtienen mediante la derivada de la integración de las velocidades de deformación en las líneas de flujo lo cual hace imposible usar ese método para problemas con viruta discontinua. La formulación euleriana no necesita el remallado debido a que los elementos no se distorsionan, además no es necesario un criterio para separar la viruta del material que si es necesario en la formulación lagrangiana. Además, este método tiene un menor coste computacional debido al menor número de elementos necesarios. Este método se ha usado principalmente en modelos donde la viruta no es de gran interés, y aunque los primeros modelos se realizaron con esta formulación hoy en día se usa en menor medida.

Las ecuaciones que caracterizan el comportamiento de un material frente a cargas externas pudiendo calcular las tensiones y deformaciones que se producen en el material se denominan ecuaciones constitutivas. Estas se explicarán en profundidad en el capítulo de materiales del modelo numérico presente en la Tesis.

### **3.3. Estado del arte en modelos numéricos de mecanizado**

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de las publicaciones que se basan en modelado numérico del mecanizado de distintos materiales con elementos finitos. Desde los 1970 se ha incrementado gran número de publicaciones sobre este tema que demuestran la gran importancia de este tipo de modelos para aumentar el conocimiento que se tiene en los procesos de mecanizado.

En la primera década desde su aparición, los modelos numéricos se desarrollaron con una formulación euleriana con códigos propios que permitiesen tener una viruta continua. Numerosos investigadores siguen usando esta formulación debido a sus ventajas, sin embargo, en la actualidad, la formulación lagrangiana es la más usada en el modelado de mecanizado de metales.

En la década de los 90 debido a la aparición de softwares comerciales de elementos finitos se observó un gran aumento en las publicaciones que hacían referencia a modelos numéricos sobre mecanizado de metales. Estos programas han sido aceptados por los investigadores debido a que han sido analizados y programados por especialistas y los resultados obtenidos por los mismos presenta una correlación aceptable con los procesos reales modelados, pudiendo simplificar el proceso de construir un código de elementos finitos desde cero.

En los últimos años el número de investigaciones y modelos numéricos ha continuado aumentando con distintos modelos de materiales y de fricción con el objetivo de analizar desgaste y morfología de la viruta, fuerzas de corte, temperatura, integridad superficial, tensiones residuales, etc. Estas investigaciones se han realizado desde modelos numéricos de dos y tres dimensiones en función de la complejidad del proceso de validar y de los parámetros a investigar.

A día de hoy existen modelos numéricos tanto 2D [81]–[83] como 3D [84]–[86] en función de los parámetros que se estudian y las condiciones de contorno de cada problema. Existen diferentes investigaciones que comparan los resultados de modelos numéricos 2D y 3D. E. Segebade et al. [87] analizaron la capacidad de la formación de viruta con un modelo 2D y 3D con remallado en el mecanizado de AISI4140. Los resultados en fuerzas de corte tuvieron un error similar, considerando que las simulaciones 3D sobreestimaron los valores generalmente. M. Asad et al. [88] también compararon los resultados de simulaciones 2D y 3D. Se observaron ciertas limitaciones del modelo 2D al no poder representar toda la sección de viruta además de no ser capaz de simular el efecto de la rebaba correctamente. Los modelos numéricos 2D, en general, permiten alcanzar mallas con elementos más pequeños pudiendo adaptarse mejor a los cambios en morfología o en la geometría de la herramienta. En el presente estudio se ha desarrollado un modelo numérico 2D para analizar las diferentes preparaciones del filo en el mecanizado con suficiente precisión.

La formulación de los elementos finitos ha sido una parte importante en algunos estudios, ya que en función de los parámetros que se quieran analizar, una formulación puede ser más adecuada que otra. G. Mathieu et al. [89] desarrollaron un modelo 3D termo-mecánico en estado estacionario y con formulación euleriana centrado en simular la distribución de temperatura entre herramienta, viruta y pieza de trabajo en el mecanizado de acero inoxidable. También otros autores [90], [91] utilizaron la formulación ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) que intenta juntar las ventajas de las dos formulaciones. Esta formulación se ha usado en investigaciones para analizar fuerzas de corte, temperaturas, tensiones residuales, contacto. Sin embargo, la combinación de las formulaciones puede originar problemas en el cálculo de las variables térmicas.

Existe una gran cantidad de modelos numéricos para distintos materiales siendo los más comunes los relativos a plásticos [92], materiales compuestos [93], [94] y metales. El mecanizado de plásticos es un reto debido a la degradación de las propiedades con la temperatura, esto hace que el análisis de estos materiales sea necesario. También en los materiales compuestos donde se necesita considerar la heterogeneidad del material y sus diferentes criterios de fallo. Por último, existen diferentes estudios centrados en el mecanizado de metales como acero [85], [95], aluminio [96], [97] o titanio [82], [98], [99], sin embargo, el mayor problema está presente en modelos de mecanizado de superaleaciones como las de base níquel [100], [101] debido a la dificultad de reproducir las elevadas temperaturas y deformaciones presentes en el proceso de corte.

En la literatura existen diferentes ecuaciones constitutivas para representar el comportamiento de los materiales como Usui et al. [102], Oxley [103], Johnson-Cook [104] o Zerilli-Armstrong [105]. Sin embargo, la más usada en los procesos de mecanizado es la ecuación de Johnson-Cook, con esta ecuación se puede representar el endurecimiento por deformación y el ablandamiento por aumento de temperatura de los materiales metálicos. Para determinar las constantes de la ecuación de Johnson-Cook normalmente se usa *Split-Hopkinson Pressure Bar* para ensayar el material en condiciones extremas, sin embargo, métodos inversos también permiten obtener estos

### 3.3 Estado del arte en modelos numéricos de mecanizado

parámetros de manera más rápida y menos costosa [106]. En la literatura existen diferentes trabajos para determinar las constantes de Johnson-Cook para el Inconel 718, F. Jafarian [107] comparó diferentes parámetros y ecuaciones de Johnson-Cook para Inconel 718 encontrando diferencias significativas en distintas constantes para el mismo material, por ello la identificación del modelo de material adecuado es de gran importancia en las simulaciones numéricas. Autores como A. Iturbe et al. [108] estudiaron la caracterización del Inconel 718, el estudio reveló que la curva de tensión-deformación dejaba de aumentar o incluso se reducía a partir de cierto valor en la zona plástica, este cambio en la curva lo aplicaron T. Özel. et al. [109] mediante elementos finitos con una ecuación de Johnson-Cook modificada. En esta tesis se ha realizado la modelización del material con la ecuación de Johnson-Cook modificada para poder ser utilizada en el software comercial seleccionado para tal fin.

Existe una gran influencia de los parámetros de corte, la geometría de la herramienta y los materiales en los procesos de mecanizado. Los modelos numéricos se han vuelto una herramienta muy útil para analizar múltiples variables de una forma relativamente barata y rápida. Existen numerosos estudios con aproximaciones numéricas que analizan la influencia de parámetros de corte como la velocidad de corte, avance, profundidad y geometría de la herramienta en resultados como fuerza de corte, morfología de viruta, contacto o temperatura. El desgaste de las herramientas también se ha estudiado para analizar la influencia de este sobre los procesos de mecanizado. B. Satyanataya et al. [101] presentaron un modelo numérico de torneado de Inconel 718 con herramienta PVD. El objetivo de este modelo era el de predecir y optimizar los procesos de producción para diferentes parámetros de corte. Se observó que lo que más afectaba a la herramienta eran la velocidad de corte debido al aumento de las temperaturas y desgaste de flanco. Todos estos parámetros han sido estudiados en diversas condiciones, sin embargo, la preparación del filo de corte no ha sido un parámetro tan estudiado en los modelos numéricos debido a que se necesita una buena resolución de malla para representarlos. D. Biermann et al. [110] analizaron numéricamente la influencia de la preparación del filo en operaciones de taladrado de Inconel 718. T. Özel [111] analizaron el efecto de mecanizar acero con herramientas CBN con dos preparaciones de filo, redondeado y achaflanado. Los resultados revelaron que el filo achaflanado obtuvo mayores fuerzas de corte, pero menores temperaturas, sin embargo, se observó que esto no afectó a la morfología de viruta.

Se ha realizado un considerable número de investigaciones sobre el mecanizado de diferentes materiales metálicos con diferentes herramientas de cortes. El mecanizado de diferentes aleaciones metálicas ha sido objeto de numerosos estudios debido a su alta aplicabilidad industrial. M. Lofti et al. [84] analizaron el desgaste y la distribución de calor en la herramienta en el mecanizado asistido por ultrasonidos de acero AISI 4140 y comparó los resultados con métodos tradicionales mediante un modelo 3D. En el modelo se observó una reducción de las temperaturas debido a la convección del calor generado en la herramienta al ambiente debido a los periodos de desconexión de contacto y por ello una reducción del desgaste de cráter y flanco. F. Klocke et al. [81] analizaron la deformación de la pieza de trabajo de C45E / AISI 1045 mediante un

modelo de elementos finitos del torneado en condiciones de seco. Para ello se realizaron dos submodelos, el primero para calcular la distribución de calor y temperatura generada en la viruta, pieza de trabajo y herramienta, el segundo submodelo se desarrolló con el flujo de calor del primero, con este se calculó la distribución de temperatura y deformación en la pieza de trabajo. El aumento de la velocidad de rotación no produjo un aumento en la temperatura de la pieza de trabajo ya que a una mayor velocidad aumenta la velocidad a la que se elimina la viruta donde se mantiene el calor. H. Persson et al. [85] realizaron un modelo 3D del torneado de AISI 4140 para analizar la formación de viruta y fuerzas de corte. K. Gok et al. [95] desarrollaron un software para calcular las energías y coeficientes de transferencia de energía en un modelo 3D de elementos finitos en el torneado de AISI 1045.

Otros materiales como el aluminio se estudiaron por diferentes autores. R. Muhammad et al. [96] presentaron un trabajo del análisis de torneado de superaleación de aluminio 3D asistido por ultrasonido aplicando en el cálculo numérico de no linealidad. S. Schindler et al. [97] analizaron la expansión térmica de la herramienta en torneado sin refrigerante de aleación de titanio con herramienta PVD. El modelo tiene como condiciones de contorno el flujo de calor, coeficientes de calor y fuerzas que han sido medidas experimentalmente obteniendo unos resultados adecuados que pueden permitir usar simulaciones para obtener mejores resultados.

También se han realizado diferentes estudios numéricos sobre el mecanizado de aleaciones de titanio debido a su alto uso en la industria. X. Soldani et al. [82] analizaron diferentes criterios de daño para analizar la energía de fractura de la aleación Ti6Al4V en procesos de mecanizado, para ello realizó un modelo de elementos finitos 2D. D. Arulkirubakaran et al. [98] realizaron un estudio experimental y modelo numérico 3D de procesos de torneado con herramienta de carburo (se asumió rígida en el modelo numérico) con diferentes texturas y pieza de trabajo Ti-6Al-4V. Se usó el modelo de material de Johnson-Cook para predecir, temperaturas, morfología de herramienta y fuerzas de mecanizado. Se observó una reducción de las temperaturas, área de contacto, coeficiente de fricción y fuerzas de contacto en las herramientas texturizadas. F. Cakir et al. [99] realizaron un modelo 2D para analizar los procesos de corte en el mecanizado asistido por ultrasonidos de aleaciones de titanio.

Debido a la baja maquinabilidad de las aleaciones de base níquel y su alto costo se han realizado cuantiosos estudios numéricos para analizar diferentes parámetros que influyen en el mecanizado que permitan la optimización y mejora de estos procesos. V. Vijayaraghavan et al. [100] realizaron un modelo de torneado de Inconel 718 con herramientas de carburo para analizar las fuerzas de cortes. Además, se realizó un modelo matemático con los datos de los resultados obtenidos con el fin de optimizar la energía consumida, siendo la profundidad de corte la que más influencia ejerce sobre la potencia seguida del ángulo de corte. A. Del Prete [112] realizó un modelo numérico para predecir la fuerzas de corte, morfología de viruta y fuerzas en el mecanizado de Inconel 718. J. Wang et al. [113] realizaron un modelo numérico 3D para predecir las tensiones residuales en el fresado de Inconel 718. Pudiendo predecir con bastante exactitud las tensiones cerca de la superficie. M. Kumar et al. [58] realizaron un modelo

### 3.4 Descripción del modelo numérico

sobre el mecanizado de Inconel 718 con herramientas de carburo para predecir las fuerzas de corte en mecanizado oblicuo. R. Reddy et al. [114] analizaron el efecto de las temperaturas de corte para distintas velocidades de corte (80-160 m/min), avances (0,08-0,018 mm/rev), y profundidades (0,5-1,5 mm) en el torneado numérico de Inconel 718 en las temperaturas de corte.

Los modelos numéricos también han permitido tener cierto conocimiento y una predicción de los desgastes que se producen al mecanizar a las superaleaciones de base níquel con diferentes herramientas. J. Díaz-Álvarez et al. [86] realizaron un modelo tridimensional de elementos finitos para analizar los mecanismos de desgaste en torneado en seco de Inconel 718. Se relacionaron los mecanismos de desgastes encontrados en ensayos con variables obtenidas en los modelos como la temperatura o deformación plástica y realizando un análisis de los desgastes en función de distintas configuraciones de herramientas. A. Madariaga et al. [115] desarrollaron un modelo 2D para analizar la influencia del desgaste de flanco en las tensiones residuales en el mecanizado de Inconel 718 de carburo.

El estudio numérico del mecanizado con herramientas PCBN ha sido analizado con el fin de tener un mejor conocimiento del comportamiento frente al desgaste de estas herramientas. L.Cheng et al. [116] analizaron la temperatura superficial en el torneado de aceros endurecidos mediante un modelo numérico tridimensional con herramientas PCBN. La temperatura máxima se dio entre el filo de corte y la superficie mecanizada, debido a que se generaba un mayor calor en el plano de cortadura que debido a fricción en la superficie de flanco. V. Kryzhanivskyy et al. [117] a partir de las temperaturas medidas en experimentos calcularon los flujos de calor entre herramienta (nueva y desgastada) y pieza de trabajo en un modelo de torneado con herramientas PCBN. Es por ello que el estudio de mecanizado de Inconel 718 con herramientas PCBN con diferentes preparaciones del filo es de gran interés para poder estudiar el efecto del filo en parámetros de difícil medida.

### **3.4. Descripción del modelo numérico**

#### **3.4.1. Código de elementos finitos**

Debido al gran aumento de uso de códigos de elementos finitos en la industria en los últimos años, se han desarrollado gran cantidad de códigos numéricos para modelizar diferentes problemas. En el caso de mecanizado, el código ha de ser capaz de analizar deformaciones no lineales que se presentan durante el proceso de arranque de viruta.

El software comercial de elementos finitos elegido para realizar las simulaciones de mecanizado en el presente trabajo fue DEFORM, el cual es un software de simulación basado en el método de elementos finitos (FEM) diseñado para analizar diferentes procesos de fabricación en la industria de los metales. DEFORM fue desarrollado explícitamente para la simulación de procesos donde tenían lugar grandes deformaciones.



El entorno de DEFORM se divide en 3 bloques: Preprocesador, *Solver* y Postprocesador. En el preprocesador se definen los siguientes datos:

- Descripción de objetos: principalmente se define la geometría de los objetos incluidos en la simulación.
- Materiales: se describe el comportamiento de los materiales mediante propiedades mecánicas y/o térmicas en las condiciones del ensayo.
- Condiciones de contacto: Se define el tipo de interacciones entre todos los objetos.
- Malla: Se define el tamaño y tipo de elemento para mallar los diferentes objetos. Además, se puede establecer diferentes criterios de remallado.
- Controles de simulación: se introducen las instrucciones y métodos para solucionar el problema numérico; tiempos de integración y de paso, condiciones del proceso con el ambiente, control de parada.

En el módulo de *Solver* se puede cambiar las opciones del cálculo del método de elementos finitos. Y por último en el Postprocesador se puede ver la solución de diferentes variables obtenidas tras la convergencia del modelo para un número de pasos de tiempo.

### 3.4.2. Geometría

Con el objetivo de profundizar en el conocimiento del efecto de la preparación del filo de la herramienta en el mecanizado de las herramientas PCBN en operaciones de acabado sobre Inconel 718, se realizaron distintos modelos con diferentes geometrías del filo de la herramienta, de esta manera se podría analizar magnitudes de difícil medición en métodos experimentales y relacionarlas con el desgaste que se origina en estas herramientas.

#### 3.4.2.1. Herramienta de corte

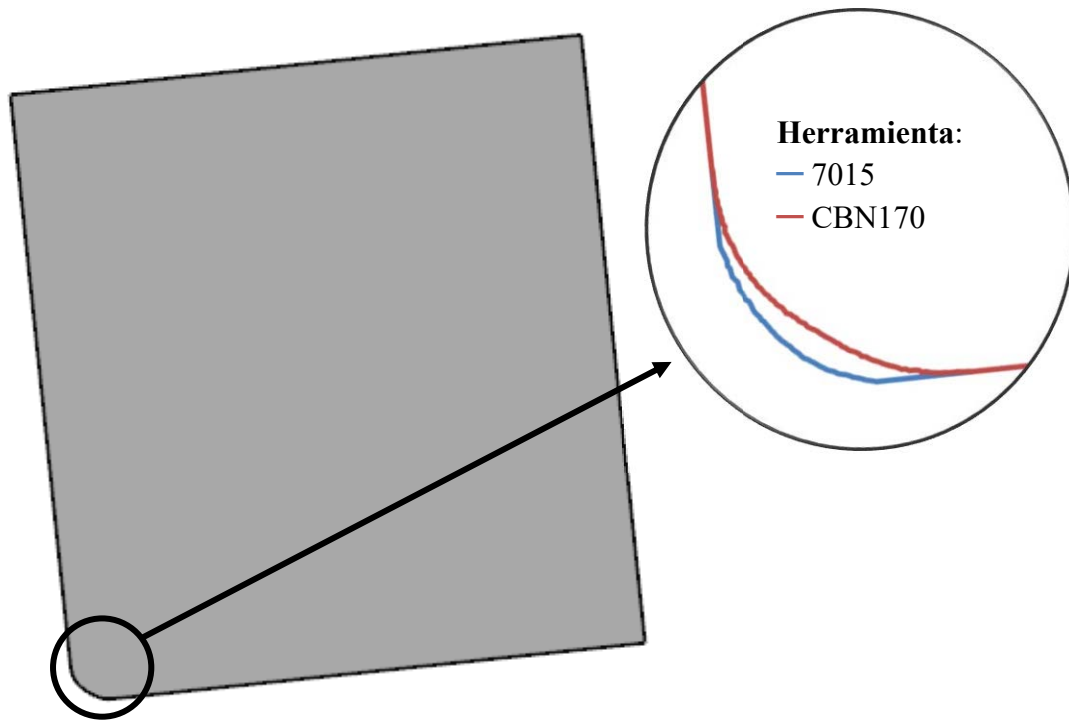
Al igual que en el capítulo de ensayos, para modelar la herramienta se usó de referencia una plaquita con el código CNGA120408 montado en un soporte con el código PCLNR2525M12. Esta configuración corresponde con un ángulo de la punta de la plaquita de 0,8 mm y un ángulo de 80°, y en el portaherramientas los ángulos de inclinación y desprendimiento son de -6°. Sin embargo, al ser un modelo 2D se analizó una simplificación de la geometría sólida de la herramienta. Modelando la sección perpendicular a la dirección de la profundidad de pasada.

La herramienta 2D se representa con un ángulo de desprendimiento de -6° y un ángulo de inclinación de 6°. La herramienta al ser la sección de una herramienta negativa tiene un ángulo de 90° entre la superficie de desprendimiento y de incidencia. El filo de corte de la herramienta se midió con el perfilómetro Mahr MarSurf XC 2 para conocer con mayor precisión las dimensiones exactas de esta geometría. Debido a que para los ensayos de validación se realizaron en la parte del filo recta y no en la punta de la

### 3.4 Descripción del modelo numérico

herramienta se modeló este tramo del perfil. La herramienta 7015 tenía un perfil elíptico similar a los ensayos de desgaste (radio menor 15,  $\mu\text{m}$  radio mayor 25  $\mu\text{m}$ ). Sin embargo, se observó que la herramienta CBN170 en la zona alejada de la punta aumenta ligeramente el radio (la geometría se podría aproximar a un radio aparente de 45  $\mu\text{m}$ ).

Para la validación del modelo se realizaron ensayos con la herramienta CBN170. Una vez validado el modelo y para tener un mayor conocimiento del efecto relativo del afilado de la herramienta en este tipo de procesos, se realizó un modelo con la geometría del filo de la herramienta 7015. En la Figura 51 se puede ver el detalle de los dos filos.



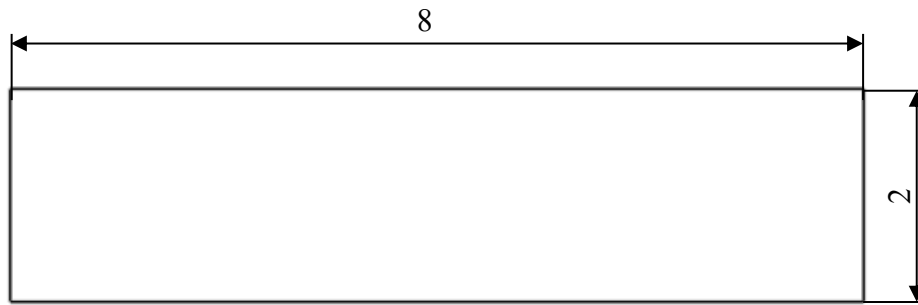
**Figura 51.** Geometría de la herramienta PCBN 2D con el detalle de la geometría de los filos de corte de la herramienta 7015 y CBN170.

Con el objetivo de minimizar el coste computacional, la geometría de la herramienta no se modelizó completamente, solamente se incluyó en el modelo el área correspondiente a la zona de la herramienta donde existe una interacción con la viruta en el espacio temporal en el que se analizan los resultados. Las dimensiones la herramienta modelada son lo suficientemente grandes para que las condiciones de contorno aplicadas no afecten a los resultados en la punta de la herramienta. Las herramientas se modelaron con una altura de 1 mm y un ancho de 1 mm.

#### 3.4.2.2. Pieza de trabajo

La geometría de la pieza se modelizó como un rectángulo. Aunque experimentalmente el ensayo se realizó en un disco, debido a la longitud característica del problema simulado, se despreció el efecto de la curvatura.

Las dimensiones de este rectángulo, al igual que la herramienta son suficientes para que las condiciones de contorno no afecten a los resultados obtenidos en la superficie mecanizada. El valor fijado para la altura del rectángulo es de 2 mm, lo que supone aproximadamente 13 veces el valor del mayor avance que se va a simular (0.15 mm/rev). La longitud del rectángulo se fijó en 8 mm, longitud suficiente para alcanzar unos valores estables de fuerza de corte. El rectángulo correspondiente a la pieza de trabajo se puede observar en la Figura 52.



*Figura 52. Geometría de la pieza de trabajo 2D.*

### 3.4.3. Materiales

El modelado del comportamiento termo-mecánico del material es uno de los principales parámetros que afecta a los resultados de los modelos numéricos de elementos finitos. Para modelar el comportamiento mecánico del material se emplean las ecuaciones constitutivas del material. Estas ecuaciones relacionan el estado tensional del material en función de diferentes variables, dependiendo de la complejidad del tipo de ecuación constitutiva elegida su modelización.

En los modelos numéricos relativos a operaciones de arranque de viruta es de vital importancia reproducir el comportamiento mecánico en régimen plástico del material, ya que son modelos en los que se busca el arranque del material llevándolo a tensiones de rotura. En la zona de contacto entre herramienta y pieza de trabajo, es donde mayores deformaciones se localizan. Los modelos constitutivos más típicos son los modelos elasto-plásticos, elasto-viscoplásticos, rígido-plástico y rígido-viscoplástico.

En un proceso de mecanizado se alcanzan en zonas muy localizadas elevadas temperaturas, deformaciones y velocidades de deformación. Este hecho hace que sea crítico seleccionar modelos constitutivos que sean capaces de recoger el efecto de las citadas variables en el estado tensional de cada material, así como relacionar las mismas con las tensiones últimas a rotura.

El material objeto de las simulaciones puede alcanzar durante su mecanizado temperaturas superiores a 800 °C [118], [119], deformaciones superiores a 2 [120], [121] y una velocidad de deformación sobre  $10^5 \text{ s}^{-1}$  [122]. Por ello es importante la definición de una ley constitutiva capaz de caracterizar el material hasta los límites previamente mencionados.

### 3.4 Descripción del modelo numérico

Las variables de las ecuaciones son en muchas ocasiones difíciles de obtener debido a las condiciones extremas durante el mecanizado que hace que ensayos estándares de caracterización no sean suficientes para reproducir las condiciones extremas del mecanizado. Por ello surge la necesidad de realizar ensayos dinámicos para este tipo de operaciones y así obtener parámetros del material adecuados. SHPB (*Split Hopkinson Pressure Bar*) es uno de los métodos más usado, en el cual las probetas son deformadas a velocidades de hasta  $10^5$  s<sup>-1</sup> y temperaturas cercanas a los 700 °C.

Sin embargo, esos ensayos no son suficientes en muchos metales con excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas y con un corte que no es unidireccional sino un sistema de cargas en tres direcciones, que lleva al material a límites que no pueden ser reproducidos mediante métodos convencionales.

Existen diferentes ecuaciones constitutivas que han sido usadas para el mecanizado de materiales metálicos. Hay diferencias entre ellas y en función de su aplicación se debe elegir entre unas u otras. En el caso de mecanizado existen varias ecuaciones como la de Usui, Maekawa y Shirakashi [102]. A continuación, se muestra la ecuación constitutiva.

$$\sigma = B \left[ \frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right] e^{-kT} \left[ \frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^m \left\{ \int e^{-kT/N} \left[ \frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^{-m/N} d\epsilon \right\}^N \quad (6)$$

Donde B es el factor de endurecimiento, m depende de la velocidad de deformación y n es el factor de endurecimiento por deformación, T la temperatura, k y m son constantes del propio material.

Sin embargo, la ecuación constitutiva más usada en la actualidad en procesos de mecanizado es la ecuación de Johnson-Cook debido a que consigue representar el comportamiento de materiales metálicos sometidos a altas deformaciones, altas velocidades de deformación y elevadas temperaturas. Es por ello por lo que se pueden implementar diferentes modelos numéricos como los relativos a impactos a alta velocidad o mecanizado. A continuación, se muestra la ecuación constitutiva de Johnson Cook.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_a}{T_m - T_a} \right)^m \right] \quad (7)$$

Donde:

- A: Limite elástico. [Pa]
- B: Factor de endurecimiento por deformación. [Pa]
- C: coeficiente de sensibilidad de la velocidad de deformación
- n: exponente de endurecimiento por deformación

- m: exponente de sensibilidad de la temperatura
- $\epsilon$ : Deformación plástica efectiva.
- $\dot{\epsilon}$ : Velocidad de deformación plástica de referencia. [s<sup>-1</sup>]
- T<sub>m</sub>: Temperatura de fusión. [°C]
- T<sub>a</sub>: Temperatura ambiente. [°C]

Merece la pena destacar, como se ha dicho, que el efecto por el endurecimiento por deformación, la velocidad de deformación plástica y el efecto del ablandamiento del material debido a la temperatura están presentes en la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.

Endurecimiento por deformación: El metal al deformarse aumenta su resistencia, el exponente de la ecuación (n) depende directamente del endurecimiento del material, por ello al aumentar el valor de exponente el material es más sensible a la deformación aumentando su resistencia.

$$(A + B\epsilon^n) \quad (8)$$

Ablandamiento con la temperatura: la sensibilidad del material a la temperatura depende del parámetro m, el material se vuelve más sensible a la temperatura con la disminución del valor del exponente m. Al reducir el módulo de elasticidad, se reduce por consiguiente la resistencia.

$$\left(\frac{T - T_a}{T_m - T_a}\right)^m < 1 \quad (9)$$

Velocidad de deformación. El aumento de las dimensiones en un intervalo de tiempo se mide en función del parámetro C. Al aumentar el valor de C la velocidad por deformación aumenta y por consiguiente los esfuerzos necesarios para deformar un material. A medida que la velocidad de mecanizado aumenta, este parámetro tendrá una mayor importancia.

$$\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] \quad (10)$$

#### 3.4.3.1. Inconel 718

El Inconel 718 se modeló mediante la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, ya que como se ha explicado anteriormente este material posee unas excepcionales propiedades a elevadas temperaturas, por ello la ecuación de Johnson-Cook es la adecuada para modelar este tipo de materiales. A continuación, se pueden ver en la Tabla 13 los principales parámetros de la ecuación constitutiva y de la densidad utilizados en el modelo numérico desarrollado. La temperatura ambiente que se definió para el modelo fue de 20 °C. Esta ecuación se ha seleccionado por tener el mayor parecido con los

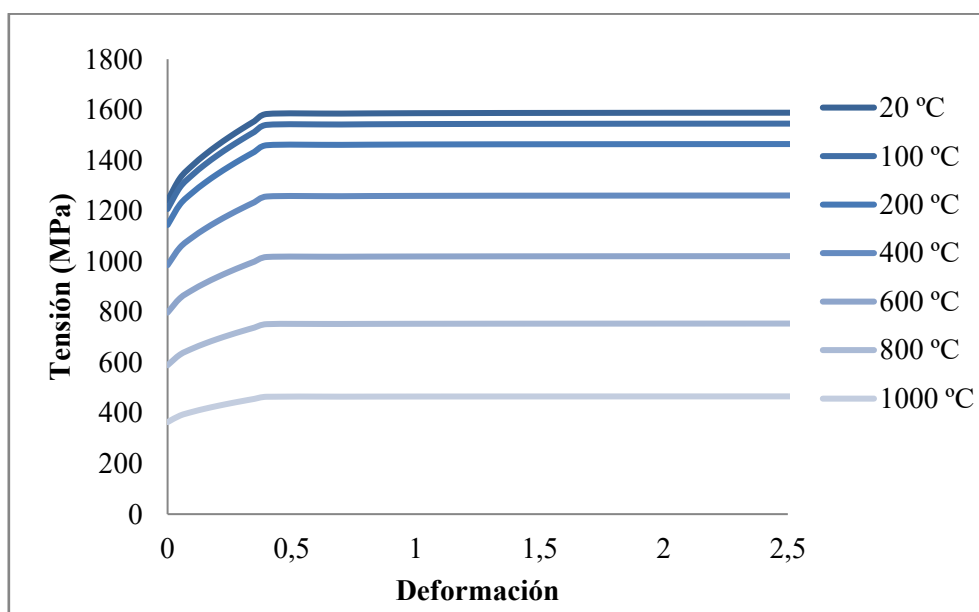
### 3.4 Descripción del modelo numérico

datos experimentales de límite elástico y tensión de rotura dados por el fabricante. Además esta ecuación ha sido utilizada por diversos autores para el modelado de Inconel 718 [83], [123], [124]. Otros parámetros de la ecuación de Johnson-Cook fueron estudiados, pero se descartaron debido a que eran menos representativos del material ensayado.

**Tabla 13.** Parámetros de la ecuación de Johnson-Cook correspondiente al Inconel 718.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	A (MPa)	B (-)	n (-)	c (-)	m (-)	Tm (°C)	$\dot{\epsilon}$ (1/s)
8200	1241	622	0,6522	0,0134	1,3	1300	1

Las curvas de tensión-deformación de Johnson-Cook del Inconel 718 se modificaron para representar mejor el comportamiento del material. A partir de deformaciones de 0.4 el material dejaba de endurecerse para mantenerse en unos valores de tensión constantes independientemente de la deformación alcanzada. Estas curvas han sido usadas por algunos autores como T. Ozel et al. [70] e Iturbe et al. [71]. Los cuales se basaron en curvas de tensión-deformación similares usadas por otros autores como B. Zhang et al. [125] y J. DeMange et al. [126]. Las curvas de tensión-deformación del Inconel 718 en función de la temperatura usadas en el software Deform 2D se muestran en la Figura 53.



**Figura 53.** Curva de tensión deformación para diferentes temperaturas del Inconel 718 ( $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ )

La dependencia de las propiedades como el módulo de elasticidad y coeficiente de poisson con la temperatura es un factor importante en el mecanizado. Como se observa en la Tabla 14, el módulo elástico del material decae significativamente con la temperatura. En el modelo numérico desarrollado, por simplicidad, se consideró una tendencia lineal en la evolución del módulo elástico y coeficiente de poisson del material para el rango de temperaturas del problema.

**Tabla 14.** Módulo de elasticidad y coeficiente de poisson para diferentes valores de temperatura.

<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	<b>Poisson</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
217000	0,3	20
156000	0,3	871

Otras características importantes que afectan directamente en el mecanizado al aumentar la temperatura es la conductividad térmica y así la capacidad de transmitir el calor que tienen estos materiales en función de la temperatura. También la capacidad calorífica específica que cuantifica la cantidad de energía necesaria para aumentar o disminuir la temperatura e indica la dificultad que presenta un material de aumentar su temperatura. En la Tabla 15 se listan los valores de estos dos parámetros utilizados en el modelo en función de la temperatura.

**Tabla 15.** Conductividad térmica ( $W/m/^{\circ}C$ ) y calor específico ( $J/kg/^{\circ}C$ ) en función de la temperatura para el Inconel 718.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Conductividad térmica (<math>W/m/^{\circ}C</math>)</b>	<b>Calor específico (<math>J/kg/^{\circ}C</math>)</b>
20	10,32	436
100	11,88	463
200	13,60	494
300	16,60	519
400	16,67	544
500	18,47	562
600	20,93	581
700	24,15	615
800	26,09	650
900	25,72	632
1000	26,32	641
1100	29,01	665
1200	30,95	676
1371	30,95	676
1500	30,95	676

El coeficiente de expansión térmica también se definió en el modelo en función de la temperatura, el cual se expresa para definir el cambio de longitud que sufre un material al producirse un cambio de temperatura. Los materiales más blandos suelen tener un coeficiente de expansión alto mientras que materiales más duros tienen un coeficiente bajo. A continuación, se muestra el coeficiente de expansión térmica del Inconel 718 en función de la temperatura usado en el modelo numérico (ver Tabla 16).

### 3.4 Descripción del modelo numérico

**Tabla 16.** Coeficiente de expansión térmica frente en función de la temperatura para el Inconel 718.

Coeficiente de expansión térmica	Temperatura (°C)
1,30e-5	20
1,31e-5	100
1,35e-5	200
1,41e-5	400
1,43e-5	500
1,58e-5	700

#### 3.4.3.2. PCBN

Las herramientas PCBN se modelaron como elementos rígidos. Las propiedades de la herramienta están basadas en datos obtenidos por autores que han trabajado con materiales similares [47], [127], [128]. La Tabla 17 muestra las principales propiedades de la herramienta. La herramienta se modeló con un comportamiento rígido debido a que la herramienta tenía una resistencia mucho mayor que la del material mecanizado y por consiguiente este no va a sufrir deformación plástica.

**Tabla 17.** Propiedades de la herramienta PCBN modelizada.

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	3400
Módulo de elasticidad (MPa)	610000
Coeficiente de poisson	0,3
Conductividad (W/m/°C)	110
Capacidad calorífica (J/kg/°C)	640

Al ser una herramienta rígida no se estudió el efecto de las tensiones y deformaciones en la herramienta, sin embargo, se calculó el efecto térmico en la herramienta.

Como se ha mencionado se realizaron diferentes modelos numéricos con diferentes avances. Se consideró el recubrimiento de las herramientas en la interacción pieza-herramienta, principalmente afectando a la fricción entre ambos elementos.

#### 3.4.4. Condiciones de contorno mecánicas

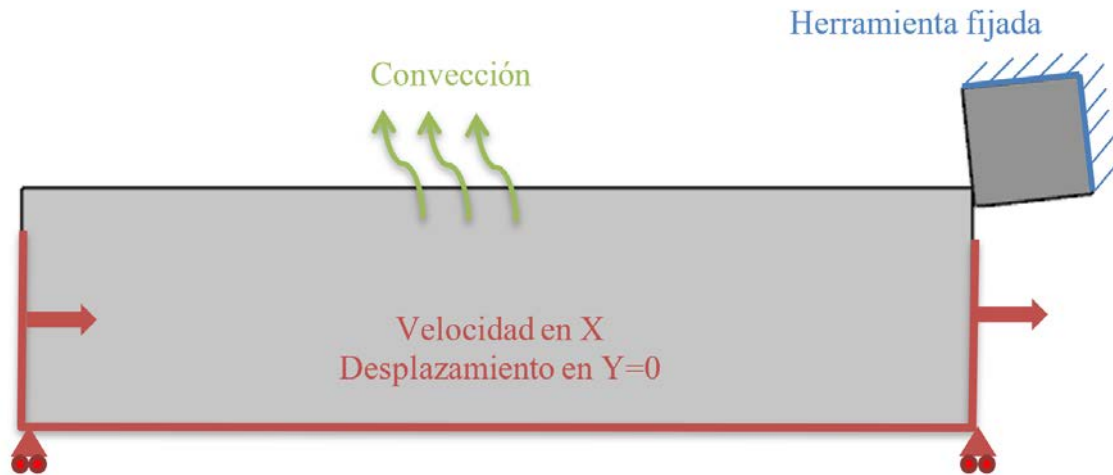
En este capítulo se explicarán las condiciones de contorno definidas en el modelo numérico para representar los ensayos realizados.

La velocidad de corte se ha impuesto en los lados exteriores de la pieza de trabajo que no interaccionan con la herramienta. Al ser un modelo 2D se impuso la velocidad en el eje X del valor de la velocidad de corte, mientras que en el eje Y se restringió el



desplazamiento. Los lados donde se impusieron estas condiciones de contorno se pueden ver en la Figura 54.

La herramienta se considera rígida, además, se restringió todos los movimientos de la superficie. Por esta razón la herramienta se quedó en una posición fija durante todo el proceso de corte.



*Figura 54. Condiciones de contorno del modelo numérico.*

### 3.4.5. Condiciones de contorno térmicas

Se estableció una temperatura ambiente e inicial tanto de la pieza de trabajo como de la herramienta de 20 °C, temperatura media a la que se realizaron los estudios experimentales.

Además, se estableció un coeficiente de convección con el entorno tanto de la pieza como la herramienta de un valor de 300 W/(m<sup>2</sup>·°C). El valor se corresponde a la disipación forzada de calor de las piezas hacia un aceite [83]. Este parámetro se corresponde a las condiciones con las que se han realizado los ensayos de validación.

### 3.4.6. Interacciones de contacto

Uno de los puntos críticos en los modelos numéricos relativos a procesos de mecanizado es la definición correcta de la interacción en la zona de contacto pieza-herramienta. Deform 2D tiene distintas metodologías distintas para definir la fricción en el contacto. En este caso se utilizó la ley de fricción “*Shear*”. La fuerza de fricción se define mediante la siguiente ecuación:

$$f_s = m \cdot k \quad (11)$$

Donde:

- $f_s$  es la tensión friccional.
- $k$  es el esfuerzo cortante.
- $m$  es el factor de fricción.

### 3.4 Descripción del modelo numérico

Esto establece que la fricción está en función del límite elástico del material y no de la presión normal a la superficie de contacto (como la fricción de Coulomb). La ley de Coulomb se atribuye a un contacto de deslizamiento (*sliding*), mientras que la ley *shear* se relaciona con un contacto pegado (*sticking*). En la herramienta del modelo de este estudio al tener un ángulo de desprendimiento negativo, se puede usar una aproximación a contacto tipo *sticking* en la cara de desprendimiento, haciendo la ley de fricción *shear* la más adecuada para este caso. En el caso que se tuviese una herramienta con ángulo positivo, la ley de coulomb al ser condición de *sliding* tendría una mejor aproximación

El coeficiente de fricción entre el contacto pieza de trabajo y herramienta se definió con un valor constante de 0,6. Este modelo de fricción de tipo *Shear* ha sido ampliamente usado por diferentes autores donde se han obtenido excelentes resultados al representar con gran exactitud la adhesión [109].

También se definieron las interacciones térmicas en el contacto pieza-herramienta. Se definió un coeficiente de transferencia de calor de  $45 \text{ N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$  recomendado por el desarrollador del software. Por último, la partición de calor originado por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo se definió con un valor del 50 % para la pieza y un 50 % para la herramienta [129].

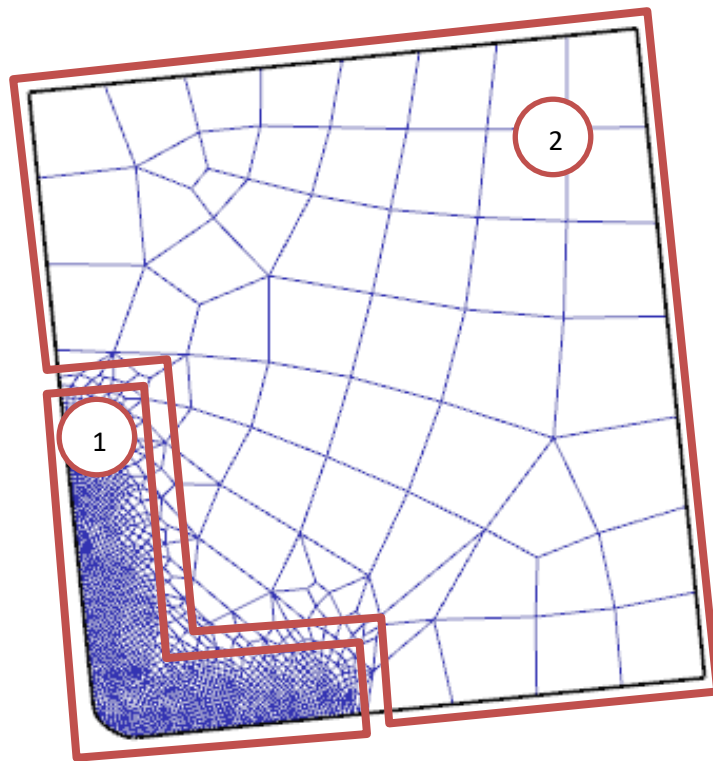
#### 3.4.7. Mallado

El mallado es una parte clave en los modelos de elementos finitos, la selección de una malla adecuada que represente adecuadamente el proceso simulado y que sea suficientemente densa en la zona de interés es de gran importancia antes de realizar el modelo. Para el modelo realizado se utilizaron elementos rectangulares de 4 nodos para todas las partes del modelo.

Con el objetivo de evitar el uso ingente de elementos que supondría un coste computacional elevado, en el modelo se definieron diferentes densidades de malla en función de la zona, esto se realizó usando ventanas de mallado para definir una malla más fina en la zona de interés y una malla con elementos de mayor tamaño lejos de la zona de interés para ahorrar recursos.

En la Figura 55 se muestran las ventanas de mallado de la herramienta de corte. Es de destacar que en la zona de contacto pieza-herramienta se define una malla con una gran densidad de elementos, ya que es en la zona donde se espera encontrar los mayores gradientes en las variables de los resultados y se requiere una buena resolución. Para la herramienta se han establecido dos ventanas:

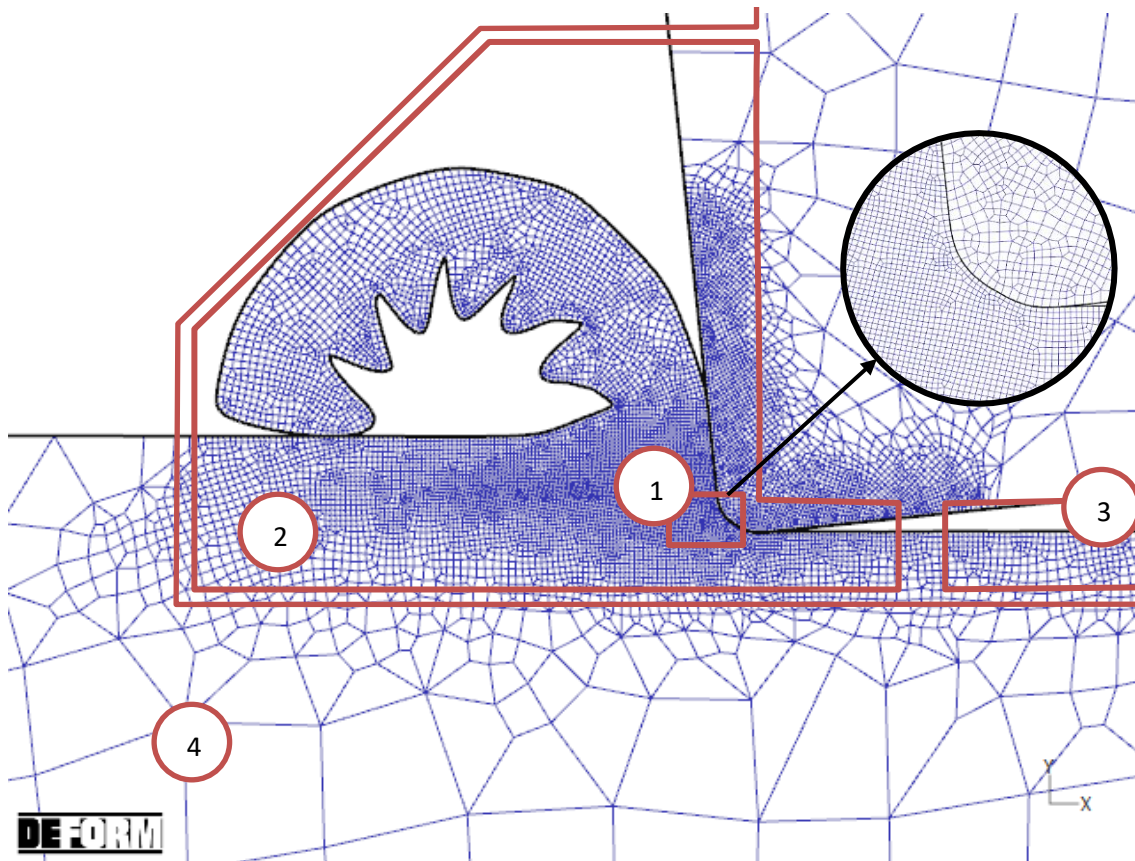
- Ventana 1. Mallado fino debido al contacto con la pieza de trabajos de un tamaño de  $5 \mu\text{m}$ .
- Ventana 2. Mallado con aumento progresivo con elementos más grandes en la zona alejada del contacto con tamaño fijado de  $14 \mu\text{m}$ .



**Figura 55.** Mallado de la herramienta de corte con sus respectivas ventanas de mallado.

En la Figura 56 se presenta el mallado del modelo correspondiente a la pieza de trabajo con las cuatro ventanas creadas para definir la malla, el tamaño de los elementos se incrementa progresivamente dentro de las ventanas de mallado. Las cuatro ventanas de mallado con diferente tamaño de elementos se describen a continuación:

- Ventana 1. Con elementos de entre 2-3  $\mu\text{m}$  en la zona cercana al filo de corte. De esta manera se modeliza con mayor resolución, ya que es la zona donde se esperan observar los mayores gradientes en las variables estudiadas.
- Ventana 2. Con elementos de 5  $\mu\text{m}$  de tamaño para la principal zona de corte. Donde se localiza la viruta, además, sirve para tener una malla transitoria para la ventana 1 y la ventana 3, el tamaño de la malla es adecuado para representar las tensiones y deformaciones.
- Ventana 3. Ventana de mallado correspondiente a la superficie mecanizada, de elementos suficientemente pequeños (15  $\mu\text{m}$ ) para analizar temperaturas y tensiones.
- Ventana 4. Por último, se define una malla con crecimiento progresivo de los elementos hasta un tamaño 150  $\mu\text{m}$ .



*Figura 56. Mallado de la pieza de trabajo durante el mecanizado con sus respectivas ventanas de mallado.*

#### 3.4.8. Análisis de la sensibilidad de la malla

Para la selección de una malla adecuada y suficiente para el modelo numérico se realizó un análisis de la sensibilidad de la malla para determinar cuál es el mallado óptimo. Se ha de tener en cuenta que a mayor número de elementos se tendrán mejores resultados. Sin embargo, también se ha de considerar que supone un aumento del coste computacional considerable. Por ello se ha de afinar la malla hasta llegar a un tamaño óptimo de elemento que converja a la solución sin que su uso represente un coste computacional no abordable.

El análisis de la sensibilidad de la malla se realizó para dos casos modelados: el primero se realizó con una velocidad de corte de 300 m/min y un avance de 0,15 mm/rev y el segundo se realizó con una velocidad de corte de 300 m/min y un avance de 0,05 mm/rev. Estos dos casos permiten analizar si el efecto de cambiar el tamaño de la sección de viruta puede afectar a la sensibilidad de la malla.

El análisis se realizó mediante el análisis de las dos componentes de la fuerza de mecanizado, comparando el valor de dicha variable en función del tamaño de elementos en la zona del contacto. Además, a pesar de que en los ensayos no se analizó en profundidad la morfología de la viruta, se precisó de un modelo con una calidad de malla suficiente para analizar esta variable. Dependiendo del avance se estudiaron distintos tamaños de elementos acorde a la sección de viruta. En la Tabla 18 se puede

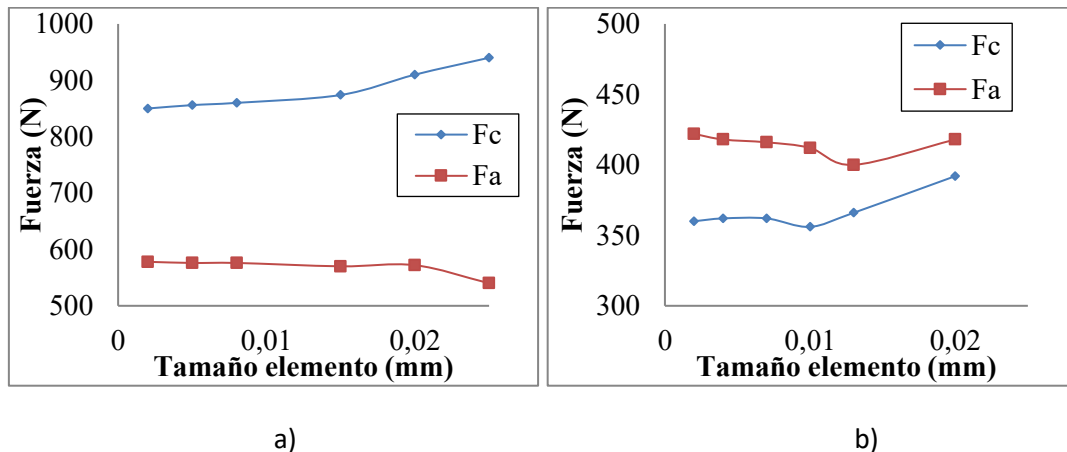
ver el tamaño de elemento usado para la malla de cada análisis. Los valores inferiores a  $2\ \mu\text{m}$  suponían un coste computacional excesivo y no se incluyeron en el análisis.

**Tabla 18.** *Tamaño de elemento de las mallas seleccionadas para el análisis de la sensibilidad de la malla para avance de 0,15 mm/rev y 0,05 mm/rev*

Avance (mm/rev)	0,05	0,15
Tamaño de elemento (mm)	0,025	0,020
	0,020	0,013
	0,015	0,010
	0,008	0,007
	0,006	0,004
	0,002	0,002

En la Figura 57 se muestra la evolución de las componentes de fuerza de mecanizado frente al tamaño de elemento usado para el análisis. Se observa que tanto para valores de avance de 0,15 mm/rev hay unos valores de fuerza de corte más elevada y menores en la componente de avance, para tamaño de malla por debajo de 0,015 mm no se observan cambios significativos en las variables analizadas. Para el avance de 0,05 mm/rev se observó una mayor dispersión de los resultados con tamaños de elementos superiores a 0,007 mm.

Para el menor de los avances es necesario mallar con elementos más finos para obtener una convergencia de resultados, debido principalmente a que al tener menos espesor de viruta se necesita elementos más pequeños para reproducir de una manera más fiel los gradientes encontrados en la zona primaria de corte.



**Figura 57.** *Análisis de la sensibilidad de la malla para la herramienta CBN170. a)  $V_c=300\ \text{m/min}$  y  $a=0,15\ \text{mm/rev}$ , y b)  $V_c=300\ \text{m/min}$  y  $a=0,05\ \text{mm/rev}$ .*

A parte de los resultados obtenidos relativos a la convergencia de los resultados de fuerza de corte obtenida con el modelo para diferentes tamaños de malla también se analizó la morfología de la viruta. Una malla insuficiente no permitía tener la suficiente precisión para poder conseguir una morfología de viruta de la misma tipología a la observada en los ensayos utilizados para la calibración del modelo (serrada para la condición de  $V_c=300\ \text{m/min}$  y  $a=0,05\ \text{mm/rev}$ ). Con tamaños de elementos más grandes que 0,01 mm la malla no es suficientemente estable para definir la viruta

### 3.5 Validación del modelo

serrada observada experimentalmente para avances de 0,15 mm/rev, por ello mallados con elementos de igual o superior tamaño se descartaron.

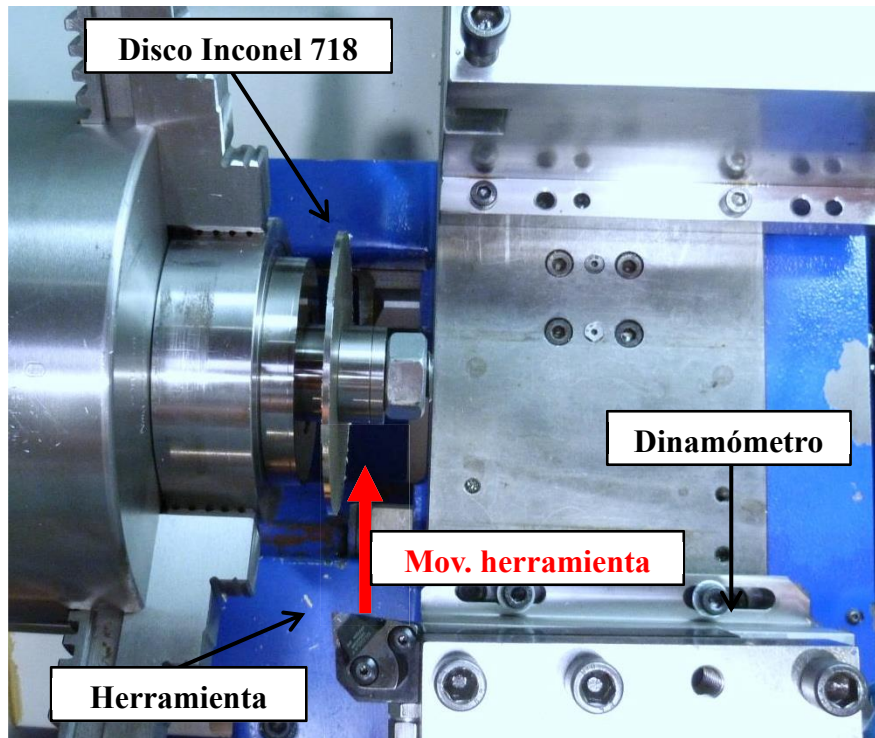
Para avance de 0,05 mm/rev pese a que con elementos de 0,007 mm se conseguía una buena convergencia de resultados relativos a las fuerzas de mecanizado y la morfología de viruta era similar a las obtenidas en los experimentos bajo similares condiciones (viruta continua). Sin embargo, no se consigue apreciar correctamente el efecto del filo de corte ni la deformación en el plano de cortadura. Con el fin tener una mayor precisión y debido a la mayor variabilidad de los resultados con elementos más grandes se seleccionó el mismo tamaño de elementos en todas las condiciones de corte modeladas.

Por ello se seleccionó un tamaño de elemento de 2  $\mu\text{m}$  justo en la zona del filo de corte, pudiéndose comparar el efecto de los dos tipos de filos modelizados. Además, se escogió esta malla para mejorar la precisión y resolución del modelo tan necesario en los análisis de morfología de viruta, con un coste de computación razonable.

### **3.5. Validación del modelo**

El modelo se validó experimentalmente mediante los resultados obtenidos en las fuerzas de mecanizado en ensayos realizados en una configuración especial para corte ortogonal que se correlacionara con los modelos numéricos 2D.

Los ensayos de validación se realizaron en el mismo torno de control numérico Pinacho Smart 6/165 que en los ensayos de desgaste, pero en este caso la operación de mecanizado es un refrentado de un disco a velocidad constante y con el avance correspondiente al ensayo. Para la medición de las fuerzas de mecanizado se utilizó un dinamómetro Kistler 9257B. Se seleccionó una herramienta de corte PCBN de Seco (CBN170) y se realizó el mecanizado de un disco de 2 mm de espesor y un diámetro de 100 mm de Inconel 718. La disposición experimental de estos ensayos para medir la fuerza de mecanizado se puede ver en la Figura 58.



*Figura 58. Disposición experimental de los ensayos de validación.*

Con esta disposición se realizó un estudio de diferentes velocidades de corte y avances similares a los estudiados en los ensayos de desgaste del capítulo 2. En la Tabla 19 se listan los parámetros de corte seleccionados para realizar los ensayos de validación. Todos los ensayos de validación se realizaron con fluido de corte a presión convencional.

*Tabla 19. Condiciones de corte para los ensayos de validación con la herramienta PCBN a presión de corte de 7,5 bar.*

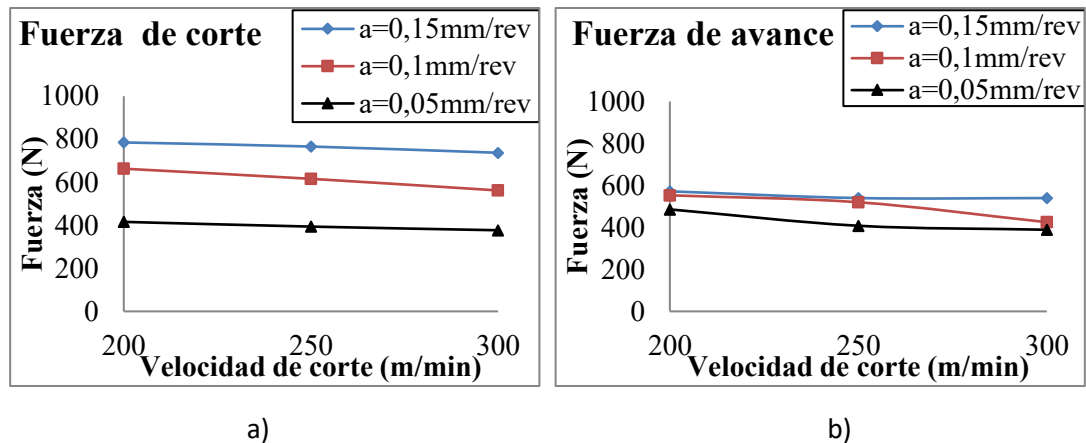
Material de corte (designación y fabricante)	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Presión del fluido de corte [bar]
PCBN (CBN170, SECO)	200 / 250 / 300	0,1 / 0,15	7,5

El tiempo de corte de cada ensayo se fijó en 1,2 segundos, tiempo suficiente para obtener resultados estables de fuerzas, manteniendo intacta la integridad de la herramienta. Todos los ensayos se realizaron con un filo de corte nuevo, para minimizar la variabilidad de la geometría de filo entre ensayos.

Los resultados de fuerza de corte y avance obtenidos experimentalmente para todas las condiciones ensayadas se pueden ver en la Figura 59.



### 3.5 Validación del modelo

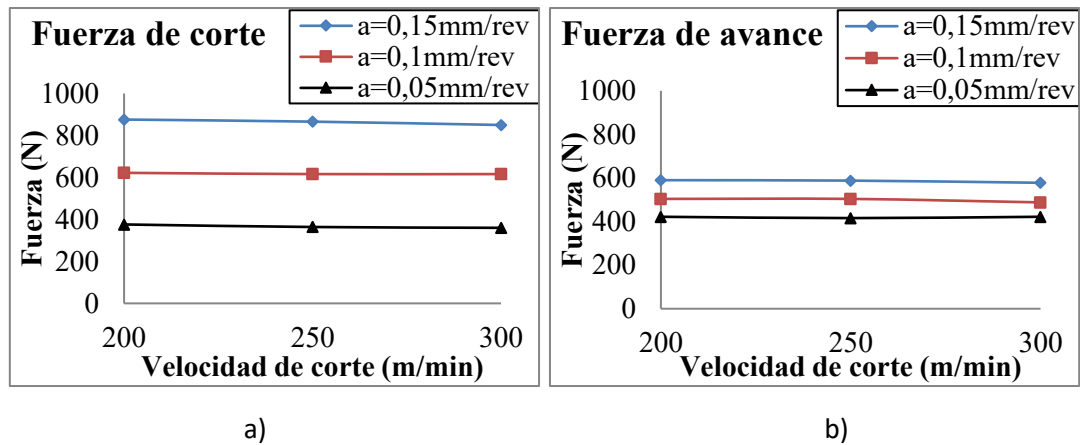


**Figura 59.** Componentes de las fuerzas de mecanizado experimentales para los ensayos de validación. a) fuerza de corte, b) fuerza de avance

Experimentalmente se puede observar una similitud en la tendencia de las fuerzas de corte con las obtenidas en ensayos de desgaste realizados en el capítulo 2. A medida que la velocidad de corte aumenta se observa una reducción de la componente de las fuerzas de corte entre el 3,9% y 18%, y una reducción de la fuerza de avance de hasta el 30,1%. En cuanto a la dependencia del avance de corte se puede observar que a medida que se reduce, la componente de fuerza de corte también se reduce entre un 15,5 % y 47 %, obteniéndose también reducciones entre el 3,3 % y 28 % para la componente de fuerza avance.

En la Figura 60 se pueden observar los resultados de las fuerzas de mecanizado obtenidas por medio del modelo numérico. Se pueden observar tendencias similares a las registradas en los ensayos. Al disminuir el avance se observa una reducción de la componente de fuerza de corte. Sin embargo, se observa una menor reducción para la fuerza de avance. Incluso a avance de 0,05 mm/rev se puede observar que la componente de fuerza de avance tiene un valor superior a la componente de la fuerza de corte. El efecto de la velocidad de corte fue poco significativo, aunque se sigue apreciando que al incrementar la velocidad de corte disminuyen las fuerzas, esto se puede ver más claramente a mayor avance de corte (0,15 mm/rev).

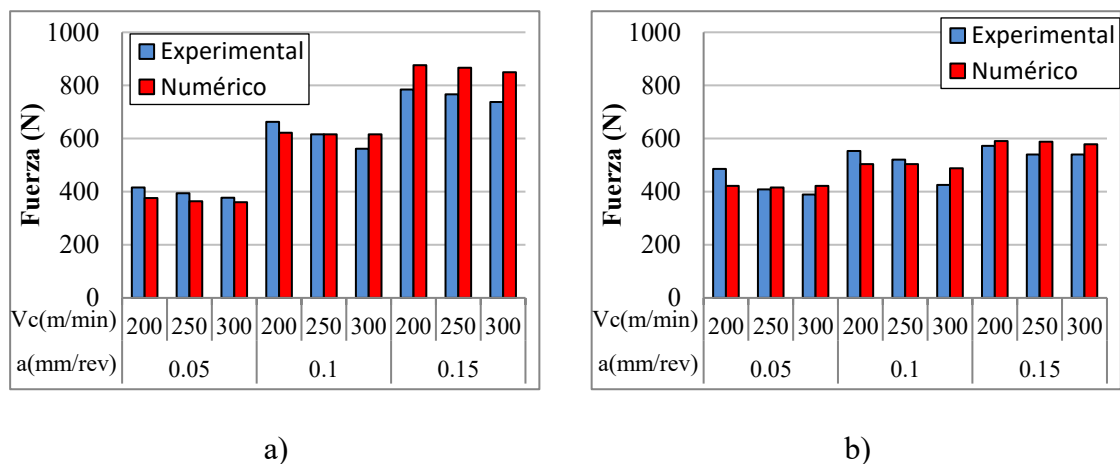




**Figura 60.** Componentes de las fuerzas de mecanizado numéricas con la herramienta PCBN (CBN 170 SECO); a) fuerza de corte, b) fuerza de avance

En la Figura 61 se presenta la comparativa de las fuerzas de avance del modelo numérico con los ensayos. El modelo numérico es capaz de predecir las fuerzas de mecanizado en comparación con los resultados experimentales con errores menores del 15 %. Al aumentar la velocidad de corte se observa una reducción de las fuerzas de corte y avance (para ambos, ensayos y modelo numérico). Sin embargo, en los ensayos de validación se observa una mayor influencia de la velocidad de corte en las fuerzas de mecanizado. El efecto del avance en las fuerzas de mecanizado es sin embargo sobreestimado por el modelo numérico.

Se puede concluir, que el modelo numérico presenta una buena correlación con los ensayos para el rango de parámetros de corte usados en la validación. Para avances de 0,1 y 0,05 mm/rev se observaron errores siempre menores al 10 %. La componente de fuerza de avance también presentó un error máximo del 15% para la velocidad de corte de 300 m/min y avance 0,1 mm/rev. Sin embargo, a mayor avance (0,15 mm/rev) presentó mejores resultados con un error máximo del 9 %.



**Figura 61.** Comparativa de las fuerzas de mecanizado numéricas y experimentales; a) fuerza de corte, b) fuerza de avance

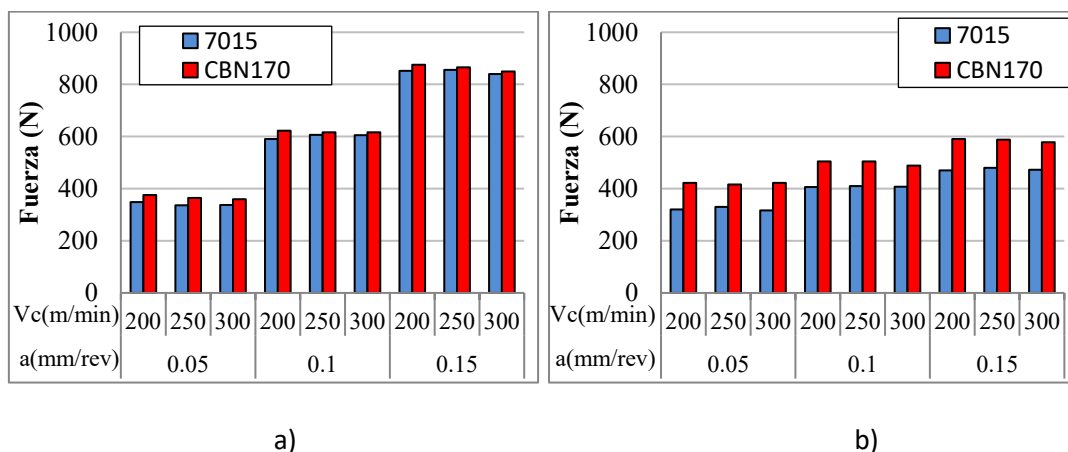
### 3.6. Resultados

#### 3.6.1. Fuerzas de corte

Además de los resultados de fuerza de corte obtenidos para la validación del modelo numérico con la herramienta CBN170, también se realizó un análisis de la herramienta 7015 con un afilado distinto. De esta manera se podría estudiar cómo afecta el afilado de herramienta al mecanizado, comparando las dos herramientas que obtuvieron mejores resultados en términos de vida de herramienta en el capítulo experimental.

En la Figura 62 se puede ver la comparación de las componentes de fuerza de mecanizado de las herramientas 7015 y CBN170 obtenidas numéricamente. En ellas se observa una tendencia similar a los resultados obtenidos en los ensayos con herramientas PCBN con fluido de corte a presión convencional, donde la herramienta CBN170 producía componentes de fuerza de mecanizado específica más elevadas, especialmente en la componente  $K_p$ . Se observa que la herramienta de 7015 con un filo de la herramienta elíptico produce unas fuerzas de mecanizado más reducidas que la herramienta CBN170. Esto se puede comprobar tanto en la componente de fuerza de corte como de avance.

Al igual que lo que se constató en los ensayos, el modelo también predice que a mayores velocidades de corte y menores avances las fuerzas de mecanizado disminuyen para ambas herramientas modeladas. Sin embargo, la variación de las fuerzas de mecanizado con la velocidad no fue tan representativa en el modelo debido a que no se tiene en cuenta el aumento de temperatura del material por las sucesivas pasadas, con el consiguiente ablandamiento del material.



**Figura 62.** Comparativa de las fuerzas de mecanizado de las herramientas 7015 y CBN170. a) Componente de la fuerza de corte, b) componente de la fuerza de avance.

Como era esperable, se observa un mayor efecto del afilado de la herramienta en las simulaciones con avances más pequeños, debido principalmente, a que el porcentaje de material que está en contacto viruta-herramienta en la zona de la zona afilada es mayor.

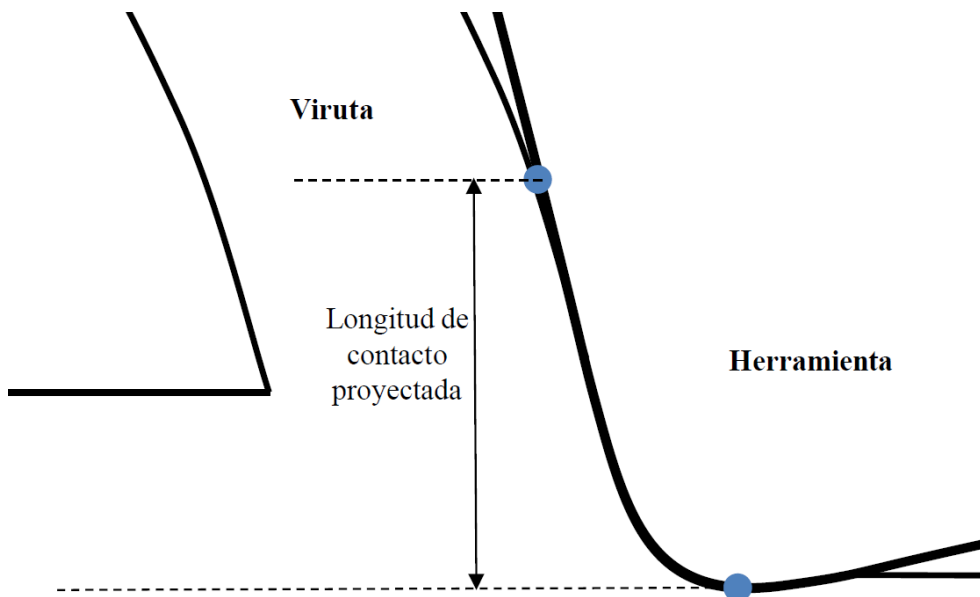
En lo relativo al efecto del afilado en las fuerzas de mecanizado, se puede apreciar que la componente de fuerza de corte y de la fuerza de avance disminuyeron entre un 1 y un

8% y un 18% y el 24% respectivamente con el uso de la herramienta 7015 que poseía un filo más agudo. Estos datos reflejan que para los dos filos analizados, hay un mayor efecto de los mismos en la componente de fuerza de avance. Este hecho puede ser explicado por la forma en la que fluye el material por debajo de la zona de incidencia de la herramienta. La herramienta CBN170 con un radio aparente de arista superior hace que fluya más material por debajo de la herramienta en comparación con la herramienta 7015, provocando un empuje de la herramienta en la dirección de avance, este efecto se conoce con el nombre de “*ploughing force*”.

Estos resultados en la fuerza de avance se correlacionan con el desgaste de herramienta encontrado experimentalmente para ensayos con parámetros de corte equivalentes, la herramienta 7015 presenta menores niveles de desgaste en la superficie de incidencia posiblemente debido a la menor fuerza de avance.

### 3.6.2. Longitud de contacto

La superficie de contacto entre la pieza y la herramienta se obtuvo para los parámetros de corte seleccionados. Para tener un mayor conocimiento de la influencia del filo y eliminar el efecto de la recuperación elástica sobre la superficie de incidencia se calculó la longitud de contacto proyectada en la dirección la sección de viruta no deformada. Es decir, se midió la altura entre el punto inferior de la herramienta y el máximo punto de contacto. En la siguiente imagen se puede ver una representación en la Figura 63.



**Figura 63.** Representación de la longitud de contacto proyectada.

Para ambas herramientas modelizadas se observó una tendencia similar de la longitud de corte proyectada con respecto a la velocidad de corte y el avance. En la Figura 64 se representa la longitud de contacto proyectada máxima en función de la velocidad de corte y el avance.

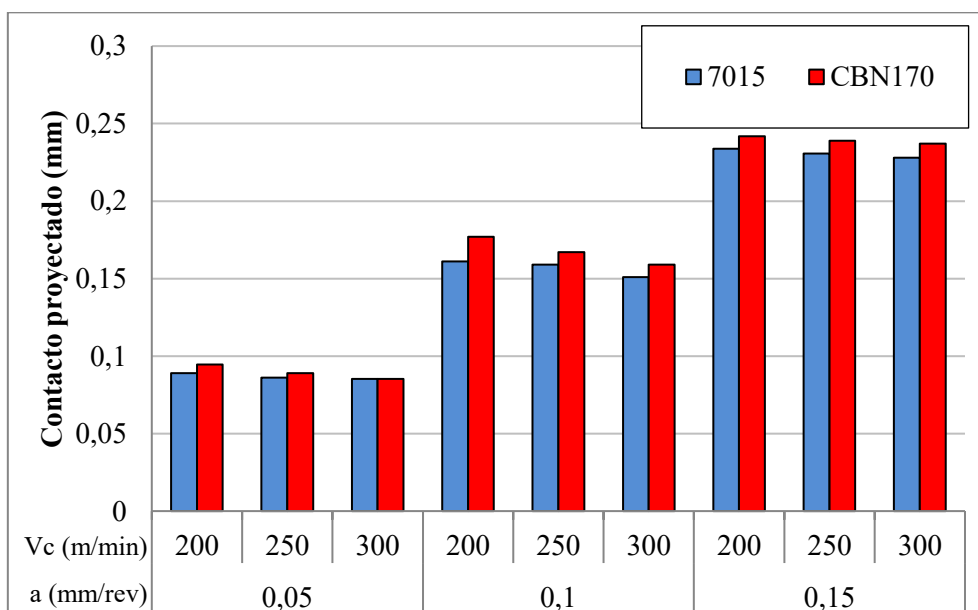
### 3.6 Resultados

Como era de esperar en ambas herramientas se encontró numéricamente, que la longitud de contacto proyectada era mínima con el avance más pequeño, creciendo está a medida que se aumentaba el avance. En lo relativo al efecto de la velocidad de corte en la longitud de contacto proyectada, se observó un leve descenso de la longitud con el aumento de la velocidad.

En este apartado hay que destacar que la longitud de contacto proyectada está directamente relacionada con la morfología de la viruta. Independientemente del tipo de herramienta, para los avances mayores 0,1 y 0,15 mm/rev la viruta encontrada era principalmente serrada y para los valores de avance 0,05 mm/rev la viruta tenía forma continua.

En los casos en los que la viruta formada era discontinua, se podía apreciar claramente como oscilaba la longitud de contacto proyectada. A modo de ejemplo, trabajando con el mayor avance (0,15 mm/rev) se obtuvieron valores máximos entre 0,22 y 0,24 mm y unos valores mínimos entre 0,13 y 0,15 mm.

Como se puede constatar en la Figura 64, la herramienta CBN 170 con una arista de radio aparente superior presenta valores de longitud de contacto mayores, esto podría ser debido principalmente a que en el caso de la arista con mayor radio aparente se presentan mayores niveles de temperatura y deformación debido a las mayores fuerzas de mecanizado originando una longitud de contacto superior [130].



**Figura 64.** Longitud de contacto máxima proyectada para las herramientas CBN170 y 7015.

#### 3.6.3. Temperatura en la pieza de trabajo

##### 3.6.3.1. Temperatura en la superficie mecanizada

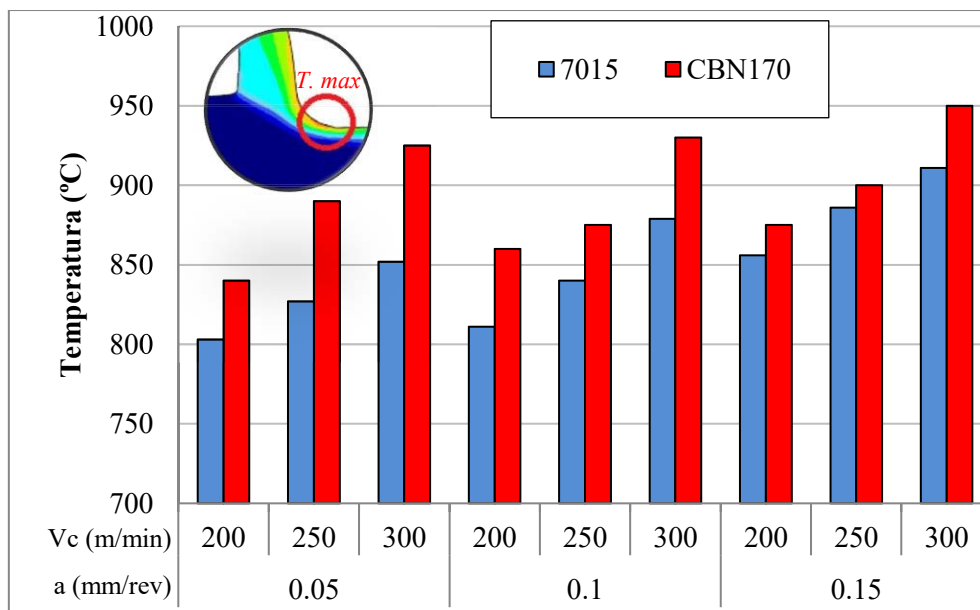
En este subapartado se analiza la temperatura máxima localizada en la nueva superficie creada después del mecanizado. Hay que destacar, que como era de esperar, la máxima temperatura se localiza en la zona de contacto pieza-herramienta, en concreto en la zona

de la punta (superficie de incidencia) para todos los casos (ver Figura 64). Esto se debe a que es una zona donde se genera calor por la fricción pieza-herramienta unido a la parte de calor generado en la zona primaria que llega por conducción.

La localización y el valor de la temperatura máxima se alcanza en la simulación desde los primeros instantes y permanece estable durante la misma.

En la Figura 65 se puede observar las temperaturas máximas alcanzadas para la pieza de trabajo bajo las condiciones de corte modelizadas. Se obtuvieron elevados valores de temperaturas entre 800 y 1000 °C en el Inconel 718. Se observó que el aumento de la velocidad de corte supuso un aumento de la temperatura en la pieza de trabajo. Esto se relaciona con el aumento de fuerzas y deformaciones producido por el mecanizado a altas velocidades [111].

Se produjo un aumento más reducido de las temperaturas con el incremento del avance. Se ha de destacar también que la herramienta 7015 producía una temperatura máxima más reducida para los modelos analizados, esto es más evidente para menores avances de corte donde el efecto del filo es más importante. Esto se debe principalmente al radio aparente, donde un mayor radio produce que una cantidad superior de material fluya por debajo de la herramienta aumentando los esfuerzos y deformaciones, y por consiguiente la temperatura en esta zona [131].



**Figura 65.** Temperatura máxima alcanzada en la pieza de trabajo para las herramientas CBN170 y 7015.

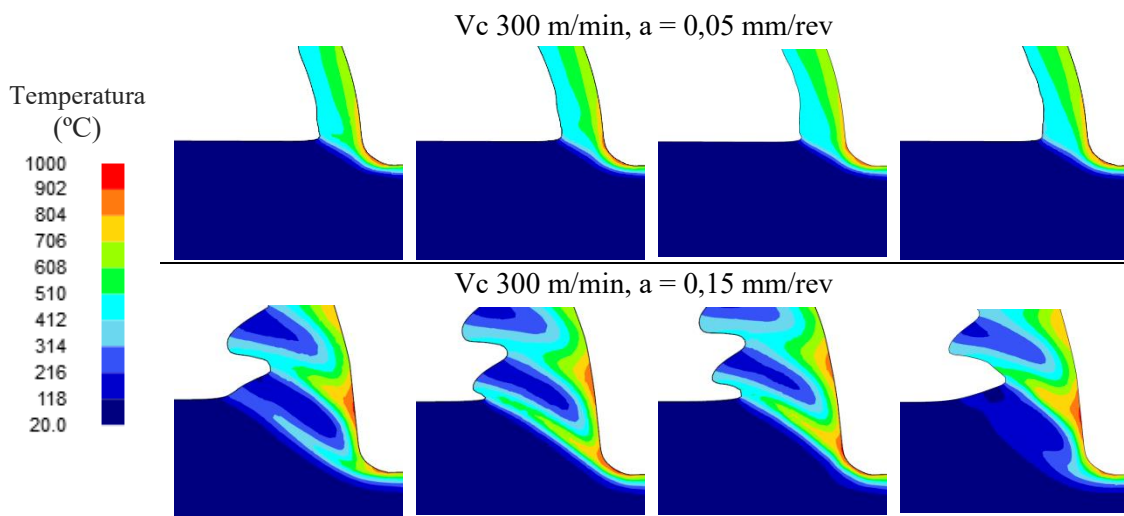
### 3.6.3.2. Temperatura en la viruta

La distribución de la temperatura estuvo muy afectada por el avance con el que se mecanizaba. Para avances de 0,05 mm/rev la temperatura máxima en la pieza de trabajo se presentaba debajo del filo de corte junto a la superficie de incidencia, además en el filo de corte cerca de la superficie de desprendimiento se observaron temperaturas prácticamente del mismo orden de magnitud

### 3.6 Resultados

Cuando la viruta tuvo morfología continua la generación de temperaturas se mantenía con una distribución creciente a lo largo del ancho de la viruta, donde en la zona de contacto con la herramienta tenía la temperatura más elevada. La viruta con morfología serrada producía una distribución discontinua donde temperaturas más altas se focalizaban en los valles de la viruta.

Sin embargo, con avance superior de 0,15 mm/rev la distribución fue totalmente distinta principalmente debido a la presencia de una viruta serrada. La temperatura máxima se generaba prácticamente en la zona debajo del filo de corte donde la deformación es más alta. La temperatura máxima en la herramienta se desplazaba por la superficie de desprendimiento hasta que se generaba otro gran foco de temperatura por las bandas de cizalladura que generaban otro diente de sierra en la viruta. En la Figura 66 se puede ver la evolución de las temperaturas en varios instantes de tiempo.



**Figura 66.** Distribución de la temperatura en la viruta con la herramienta CBN170 a velocidad de corte de 300 m/min para los avances: 0,05 mm/rev (imágenes superiores) y 0,15 mm/rev (imágenes inferiores).

Esta generación de calor en la superficie de desprendimiento es consecuente con los resultados obtenidos en los ensayos de desgaste donde a profundidades y avances más elevados estaba más presente el desgaste de cráter producido entre otros fenómenos por difusión térmica. Además, las variaciones de temperatura y esfuerzos también podrían producir alguna rotura frágil temprana en el filo.

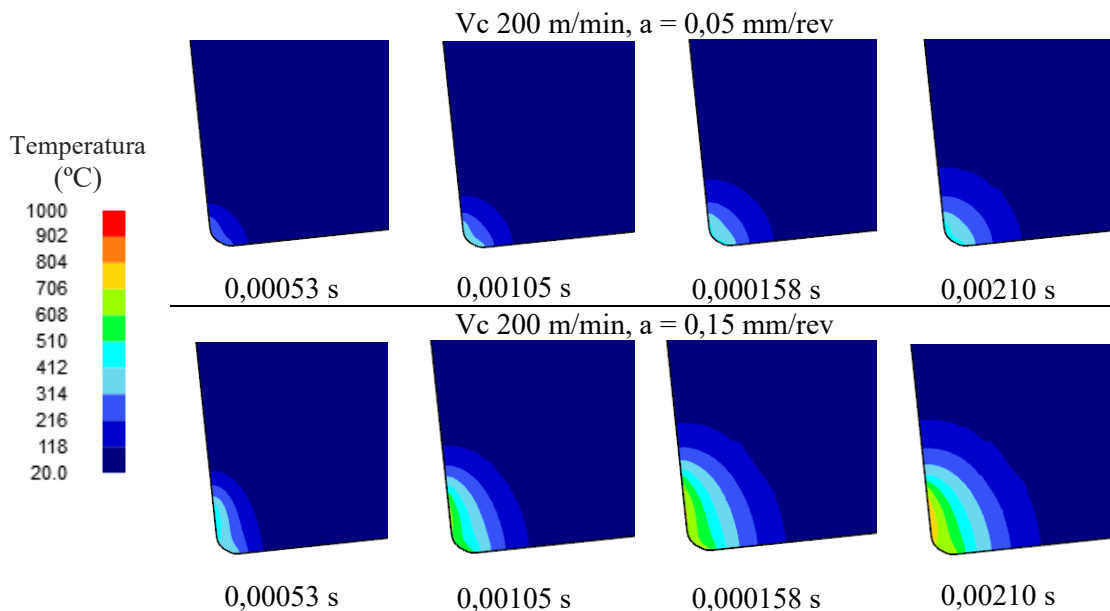
#### 3.6.4. Temperatura en la herramienta de corte

En este apartado se analiza la temperatura en la herramienta PCBN. La evolución de la temperatura en las herramientas de corte es un parámetro de gran interés debido al efecto que podría generar en el desgaste temprano de las herramientas. Tener una buena estimación de estas es esencial para poder evaluar los esfuerzos térmicos que tiene que soportar la herramienta.

En el modelo numérico termomecánico desarrollado no se han podido llegar a obtener por falta de tiempo de simulación un valor relativamente estable de temperatura en la herramienta. Es por ello, que se ha analizado la evolución de las temperaturas en la

herramienta durante el mecanizado de los 8 mm de longitud que tenía la pieza modelada.

Se ha constatado el claro efecto del avance en la localización de la temperatura máxima en la herramienta y su evolución. Se puede observar que a avances de 0,05 mm/rev la temperatura máxima está localizada en el filo de corte muy cerca de la zona donde la deformación es máxima en la pieza de trabajo. En cambio, a mayores avances se observa que la temperatura máxima de la herramienta está en la superficie de desprendimiento donde experimentalmente es muy común encontrar desgaste de cráter por las altas temperaturas en la herramienta. Esto se puede observar en la Figura 67. Este comportamiento se debe principalmente a que para avances mayores, existen mayores deformaciones en la zona primaria de corte y por tanto mayores niveles de temperatura, además de longitudes de contacto superiores que incremental la generación de calor por fricción entre viruta-herramienta, junto al calor que llega por conducción a la superficie de desprendimiento desde la punta de la herramienta.

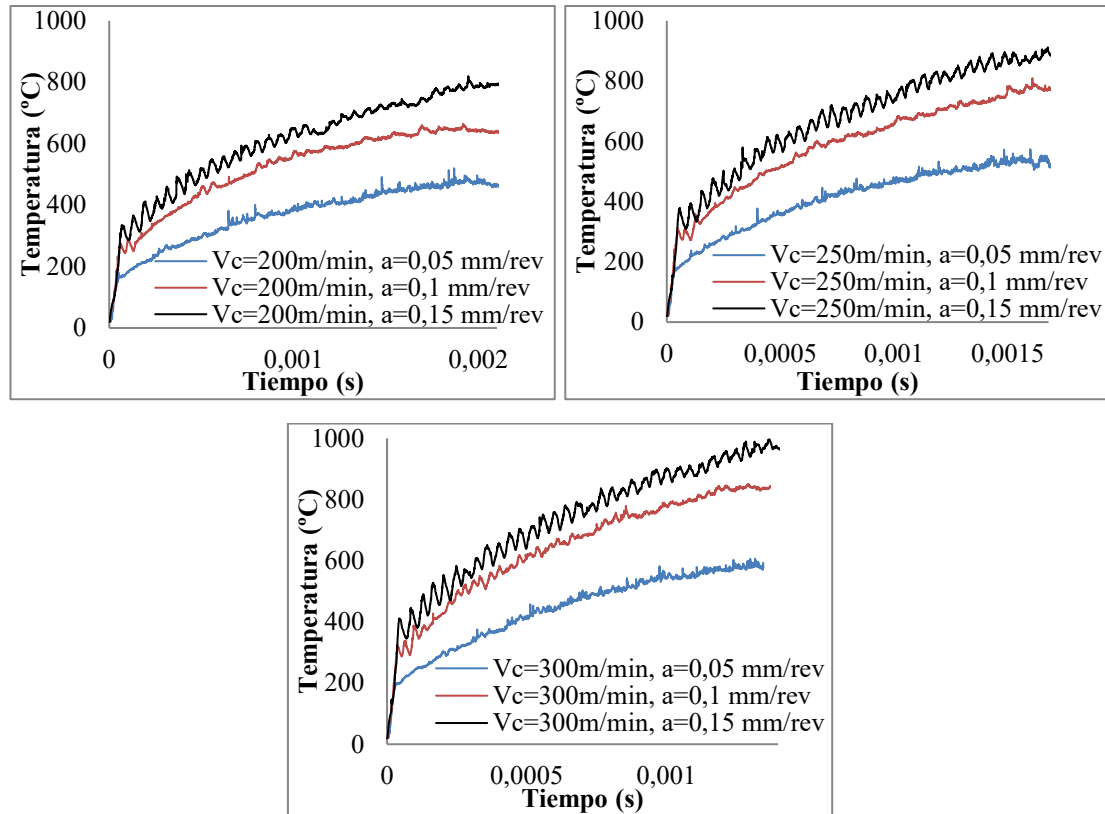


**Figura 67.** Evolución de la temperatura en la herramienta CBN170 para velocidad de corte de 200 m/min y avances de: 0,05 mm/rev (imágenes superiores) y 0,15 mm/rev (imágenes inferiores).

En cuanto al efecto de la velocidad de corte, por lo graficado en la Figura 68, se alcanzaron mayores temperaturas de corte en la herramienta a mayores velocidades de corte, principalmente se deba a que se evacua una cantidad superior de calor por la viruta y por lo tanto se produce una mayor transferencia de calor a la herramienta por conducción viruta-herramienta [119].

Aunque no se ha llegado a la estabilización total en algunos casos se puede observar que se está muy cerca dependiendo de las condiciones de corte. A velocidad de corte de 200 m/min se observa que está más cerca de la estabilización de las temperaturas, aunque con una tendencia levemente creciente, también se observó que para la misma superficie mecanizada la temperatura alcanzada en la herramienta es inferior que a velocidades de corte superiores. En la Figura 68 se observa la evolución de la temperatura máxima en herramienta de corte CBN170.

### 3.6 Resultados

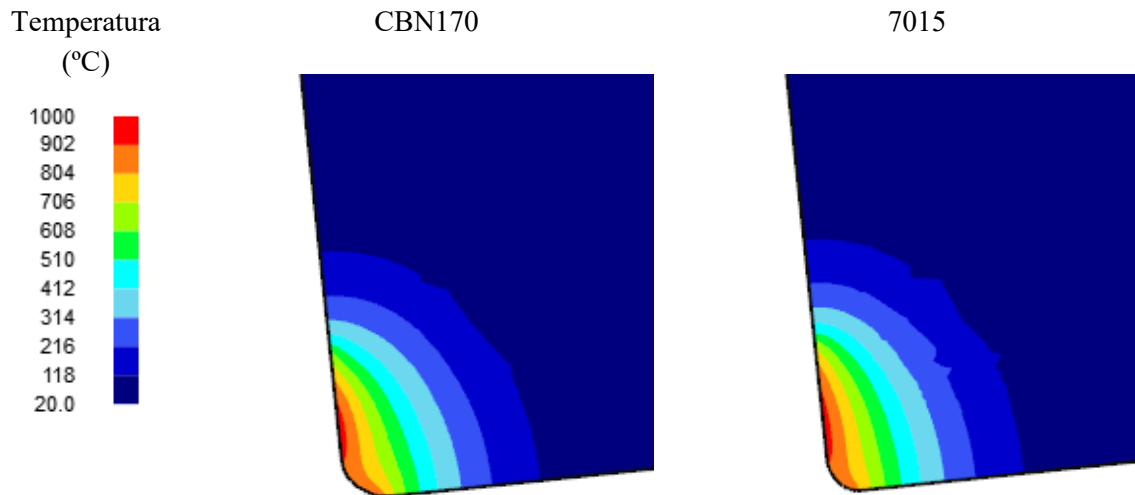


**Figura 68.** Evolución de la temperatura máxima en la herramienta CBN170.

Analizando la evolución de temperaturas de la Figura 68, se observa que, en los casos de mayor avance, aunque con tendencia creciente, la curva tiene picos durante todo el tiempo mecanizado, esto se debe principalmente a que se produce una viruta serrada que cambia la localización del foco de temperatura máximo en la pieza de trabajo.

La herramienta 7015 y la CBN170 obtuvieron unos valores y una distribución similar de las temperaturas durante el tiempo mecanizado. En la Figura 69 se puede observar la distribución de la temperatura al final del recorrido a velocidad de 300 m/min y avance de 0,15 mm/rev. Se puede observar una distribución similar donde las temperaturas de corte se centran en el filo de corte de cada herramienta, pero especialmente en la superficie de desprendimiento donde alcanza temperaturas superiores a los 900 °C. Esto explica el desgaste presente en forma de cráter en esta superficie el cual se debe a las altas temperaturas. El cambio de filo presentó mínimas diferencias en las temperaturas en la herramienta, pero esta variación no produciría un cambio en el mecanismo de desgaste.





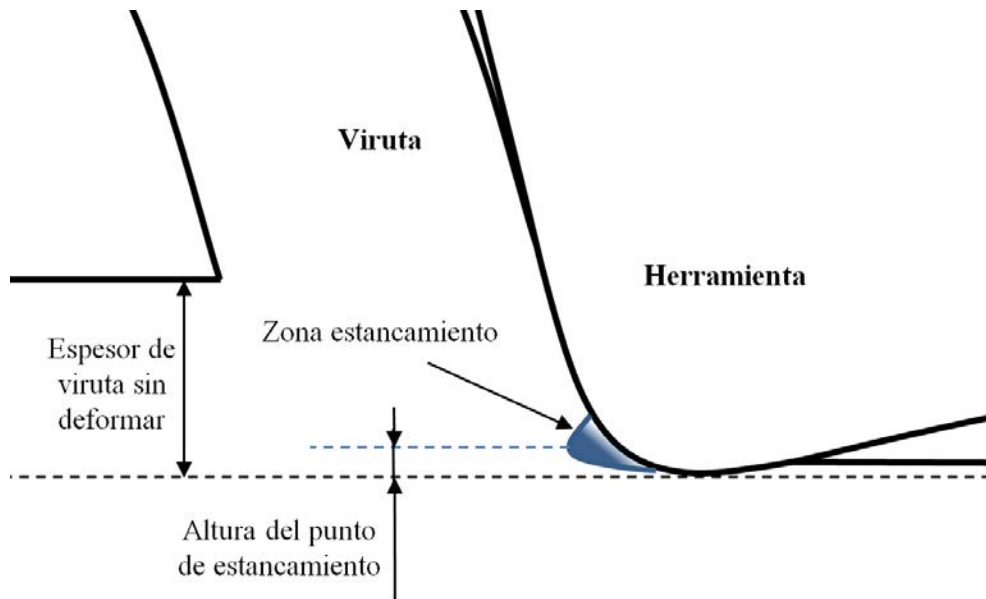
**Figura 69.** Temperatura en la punta de la herramienta para velocidad de corte de 300 m/min y avance de 0,15 mm/rev.  $t = 0,0014$  s.

### 3.6.5. Zona de estancamiento

En este apartado se analiza la zona de estancamiento en la pieza de trabajo. La zona de estancamiento, es una zona en la que el material prácticamente no tiene movimiento relativo con respecto a la herramienta por la obstrucción y acumulación de material bajo la punta de la herramienta al ser deformado durante el mecanizado. Esta zona de estancamiento es un parámetro interesante porque puede afectar directamente al desgaste de la herramienta y a la superficie mecanizada. Por ello el interés del análisis para las condiciones de corte y las herramientas seleccionadas.

La zona de estancamiento afecta directamente al efecto *ploughing* que genera una fuerza de empuje sobre la herramienta como se constató en el subapartado 3.6.1 donde se analizaron las fuerzas de mecanizado para distintos parámetros de corte. La zona de estancamiento aparece normalmente con una forma tipo embudo, cerca del filo de la herramienta. Uno de los lados suele estar apoyado en la superficie del filo de la herramienta mientras el otro vértice está en una zona más alejada a la superficie de desprendimiento, este vértice se suele denominar como punto de estancamiento. En la Figura 70 se representa la zona de estancamiento de un caso genérico, donde se ve el impacto que tiene en aspectos geométricos del mecanizado. Además, gracias a los modelos numéricos se puede observar que en la superficie mecanizada tras el paso de la herramienta se produce una cierta recuperación elástica que hace que varíe la altura de esta superficie, este efecto es mayor cuanto mayor es la zona de estancamiento.

### 3.6 Resultados

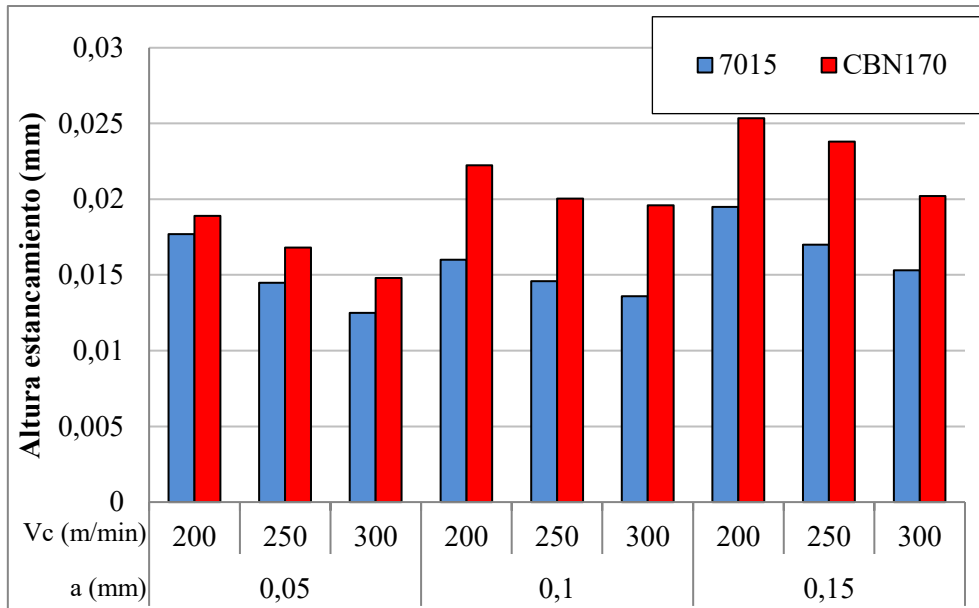


**Figura 70.** Representación de la zona de estancamiento.

Existe un gradiente de velocidad elevado entre la zona de estancamiento y el material que fluye por encima en forma de viruta y por debajo que forma la superficie mecanizada. La altura y forma de esta zona de estancamiento puede ayudar a comprender como afectan los parámetros de corte en la superficie mecanizada, ya que el aumento de la altura del punto de estancamiento produce un aumento del material que fluye debajo de la herramienta e intensifica la tensión residual máxima de compresión [132].

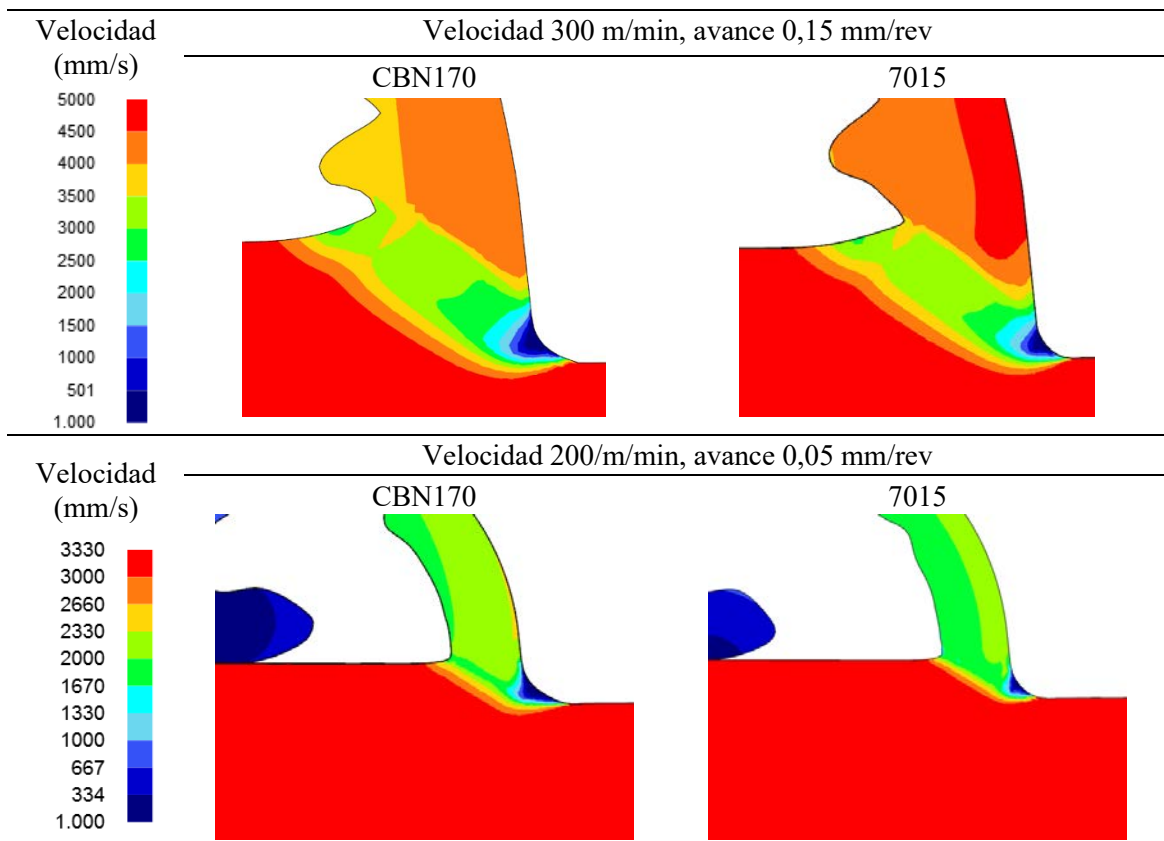
En la Figura 71 se presenta los resultados de la altura del punto de estancamiento. Se observa que la herramienta CBN170 presentó una altura del punto de estancamiento superior lo cual genera que la componente de la fuerza de avance fuese mayor como se indicó anteriormente. Esto se debe a que esta posee un radio aparente mayor que la herramienta 7015. Además, se observó que el incremento del avance también produjo un aumento del punto de estancamiento, lo cual origina un aumento de las fuerzas, del material introducido bajo la herramienta y del endurecimiento por deformación [133], [134]. Se observó una correlación clara con la velocidad de corte, aunque con un menor efecto que la variación del radio aparente de la herramienta de corte, a medida que se aumentó la velocidad de corte se produjo una reducción del punto de estancamiento[135]–[137].

Cuando la morfología de viruta fue serrada se observó alguna variación de la zona de estancamiento debido a las variaciones de deformación en la pieza de trabajo, sin embargo, se seleccionó el valor máximo cuando el corte se alcanzaba la estabilización.



**Figura 71.** Altura del punto de estancamiento máximo para las herramientas CBN170 y 7015.

En la Figura 72 se compara la distribución de velocidad en la formación de viruta para las herramientas CBN170 y 7015. Se observó una distribución similar debido a las similitudes de la forma redondeada, sin embargo, se observó una altura del punto de estancamiento superior en la herramienta CBN170, siendo uno de los parámetros que más afectan a la altura de estancamiento junto al avance [133].



**Figura 72.** Zona de estancamiento para las herramientas CBN170 y 7015. Velocidad de corte de 300 m/min y avance 0,15 mm/rev (imágenes superiores); Velocidad de corte de 200 m/min y avance 0,05 mm/rev (imágenes inferiores).

### 3.6.6. Morfología de viruta

En este subapartado se estudia la morfología de viruta para las diferentes condiciones de corte analizadas.

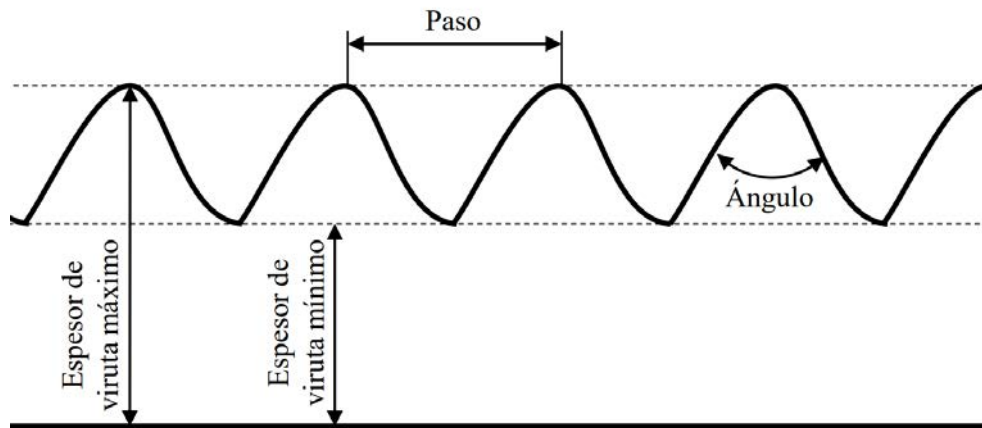
La morfología de viruta en los procesos de mecanizado es importante debido a que puede afectar tanto a la vida de la herramienta, como al acabado superficial de la pieza. El tipo de viruta puede afectar a las generaciones de fuerzas fluctuantes durante el corte, que pueden desembocar en vibraciones durante el proceso y problemas relacionados con la fatiga de la herramienta, ambos efectos relacionados íntimamente con el acabado superficial. Por ello en operaciones de acabado se ha de estudiar cómo se genera esta viruta.

En general, la morfología de la viruta se puede clasificar como continua, segmentada y serrada. Dependiendo del material, geometría, velocidades o desgaste de la herramienta puede aparecer un tipo de morfología de viruta u otra. Para las condiciones de corte ensayadas y modeladas en este estudio. Se encontraron principalmente dos tipos de morfología de viruta cuando la herramienta estaba en buenas condiciones de desgaste, continua y serrada.

Las virutas continuas normalmente están relacionadas con un buen acabado superficial, sin embargo, como es bien sabido, existe una problemática con la generación de este tipo de viruta, relacionada con lo difícil que puede ser evitar que se enrede con la pieza o usillo durante el mecanizado, pudiendo producir roturas inesperadas de herramientas e incluso máquinas, además de poder dañar las piezas mecanizadas.

Las virutas serradas no tienen continuidad a lo largo de la generación de la viruta teniendo zonas de altas deformaciones y zonas de bajas deformaciones (principalmente por cizalladura). Este tipo de viruta suele ser característica en metales que tienen una baja conductividad térmica [138].

El espesor de la viruta ha sido uno de los parámetros importantes para el análisis de la morfología de viruta. Para la viruta continua solo se midió el espesor máximo, ya que era el único parámetro característico de la viruta, sin embargo la viruta serrada se tenían dos longitudes de espesor de viruta que se podían medir, además del paso y el ángulo de los picos de la viruta [139], [140]. En la Figura 73 se puede observar los principales parámetros medidos en la viruta segmentada.



**Figura 73.** Representación de los principales parámetros medibles en una viruta serrada.

En la Tabla 20 se presentan los resultados de la morfología de la viruta para la herramienta CBN170. Los resultados en los que solo aparece el espesor máximo de la viruta se deben a que la morfología de viruta era continua y no tenía forma serrada. Se puede observar que para avances de 0,05 mm/rev la viruta era predominantemente continua. A medida que se aumentaba el avance y la velocidad de corte la posibilidad de que la viruta fuese serrada aumentaba. Esto se puede observar para la velocidad de corte de 300 m/min y 0,10 mm/rev, bajo esta condición se observó una viruta algo cambiante la cual a veces era continua y a veces serrada. Sin embargo, para avances de 0,15 mm/rev siempre se observó una viruta serrada[139], [140].

Al aumentar el avance también aumento el espesor de la sección de la viruta. Se observó que lo que más afectaba a la morfología de la viruta era el avance, sin embargo, el incremento de la velocidad de corte podía favorecer la aparición de una viruta serrada y el aumento del ángulo de sierra de la viruta como se puede observar para avance de 0,15 mm/rev [141], [139].

**Tabla 20.** Valores de las principales características de la morfología de la viruta al mecanizar con la herramienta CBN170.

Avance (mm/rev)	Velocidad de corte (m/min)	Espesor de viruta máximo (mm)	Espesor de viruta mínimo (mm)	Paso (mm)	Ángulo (°)
0,05	200	0,083			
	250	0,083			
	300	0,083			
0,10	200	0,164			
	250	0,161			
	300	0,153	0,115	0,099	64,6
0,15	200	0,244	0,157	0,057	50,5
	250	0,240	0,150	0,069	53,2
	300	0,238	0,147	0,064	55,0

### 3.7 Conclusiones

En la Tabla 21 se muestran los resultados de morfología de viruta con la herramienta 7015. Se observa que tanto los valores obtenidos como la tendencia son similares que para la herramienta CBN170. A mayor avance y velocidad de corte se aumenta la posibilidad de ver viruta segmentada. Con avance de 0,10 mm/rev se observa una viruta algo segmentada, pero con valores de paso y ángulo irregulares. Esto es debido a que se encuentra como en una transición entre serrada y continua. Además, se observa que para velocidad 250 m/min también se produce una viruta serrada con forma irregular que no se observó con la herramienta CBN170.

**Tabla 21.** Valores de las principales características de la morfología de la viruta al mecanizar con la herramienta 7015.

Avance (mm/rev)	Velocidad de corte (m/min)	Espesor de viruta máximo (mm)	Espesor de viruta mínimo (mm)	Paso (mm)	Ángulo (°)
0,05	200	0,081			
	250	0,082			
	300	0,082			
0,10	200	0,161			
	250	0,161	0,137	0,117	86,0
	300	0,151	0,117	0,082	74,1
0,15	200	0,242	0,156	0,057	49,0
	250	0,239	0,150	0,060	50,1
	300	0,238	0,144	0,075	53,2

No se observa una tendencia tan significativa en los resultados al comparar las dos herramientas en comparación con el avance y velocidad de corte. Se observa un espesor de viruta y un aun ángulo de diente de sierra ligeramente inferior con la herramienta de radio aparente inferior [142]. Cuando se forma una viruta serrada estable se observa una morfología de viruta con un paso entre 0,05 y 0,1 mm y un ángulo entre 49y 60°. Sin embargo, cuando se forma una viruta serrada no totalmente desarrollada con avances de 0,1 mm/rev, la morfología de la viruta tiene mayor dispersión en el paso de los picos de la viruta y ángulos con valores más elevados.

### 3.7. Conclusiones

En este capítulo se describió el desarrollo del modelo número 2D usado para una mejor comprensión del efecto del afilado de la herramienta bajo diferentes condiciones de mecanizado en variables que poseen un alto impacto en el comportamiento en servicio del material a mecanizar y de la vida de herramienta.

El modelo numérico 2D desarrollado en el capítulo se ha validado para la geometría del filo de la herramienta CBN170. La validación se realizó comparando fuerzas de mecanizado medidas experimentalmente y las obtenidas mediante el modelo numérico, obteniendo buenas correlaciones (diferencias menores al 15 %).

El efecto de dosafilados de herramienta PCBN distintos se ha analizado numéricamente para estudiar su influencia bajo diferentes condiciones de corte en el mecanizado de Inconel 718. Las principales conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados del modelo numérico se exponen a continuación:

- Se analizó el efecto de las condiciones de corte en las fuerzas de mecanizado. Se observó una buena correlación de los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente. El efecto del avance en las fuerzas de mecanizado predicho por el modelo numérico era igual de significativo que lo encontrado en los ensayos. Sin embargo, el impacto de la variación de la velocidad de corte en las fuerzas de mecanizado no fue tan fielmente recogido por el modelo, esto se debe a que en el modelo numérico no se tiene en cuenta el efecto de las pasadas sucesivas y por lo tanto el ablandamiento del material causado por el calentamiento del material no fue tan significativo.
- Se evaluaron y compararon las fuerzas de mecanizado de las herramientas CBN170 y 7015 para analizar el efecto del filo de corte. Se obtuvo, que la herramienta más afilada (7015) produjo componentes de la fuerza de mecanizado inferiores, entre un 1 % y un 8 % para la componente de fuerza de corte, y una reducción más significativa para la componente de la fuerza de avance donde se encontraron reducciones entre el 18 % y el 25 %. La reducción en las componentes de la fuerza de mecanizado, especialmente la fuerza de avance, se correlaciona con los valores de fuerza medidos en los ensayos de desgaste, y se debe a que la herramienta de filo redondeado (CBN170) al tener un radio aparente mayor, provoca que fluya una cantidad superior de material bajo la herramienta provocando un empuje en la dirección de avance. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- La longitud de contacto proyectada presentó una tendencia similar en los dosafilados de herramienta PCBN para las velocidades de corte y avances estudiados. La herramienta con filo redondeado presentó valores superiores de longitud de contacto proyectada debido a que la viruta presenta mayores niveles de deformación y temperatura. El aumento del avance supuso un incremento de la longitud de contacto proyectada. En cambio, se observó que el aumento de la velocidad de corte produjo un ligero descenso de la longitud de contacto.
- La temperatura máxima alcanzada en la pieza de trabajo se estabilizó durante los primeros instantes de corte en la zona de la punta de la herramienta cerca de la superficie de incidencia. Se obtuvieron valores elevados de temperatura entre 800 °C y 1000 °C. El incremento de la velocidad de corte supuso un aumento considerable de las temperaturas en la pieza de trabajo, el aumento del avance produjo una tendencia similar, pero con un crecimiento menor. En las simulaciones correspondientes a la herramienta filo redondeado se observaron temperaturas superiores en la pieza de trabajo, principalmente en la zona debajo del filo de corte, Este efecto también se relaciona con el radio aparente superior

### 3.7 Conclusiones

que incrementaba el material que fluía bajo la herramienta y por consiguiente los niveles de deformación y temperatura.

- La evolución de la temperatura en la herramienta se analizó durante la longitud de corte simulada final de 8 mm. Se observó, que para avances de 0,05 mm/rev, la temperatura máxima se localizaba en la zona del filo de corte en la que se producían las máximas deformaciones. Sin embargo, para avances superiores, en las 2 geometrías de filo de corte modelizadas la temperatura más elevada se obtenía en la superficie de desprendimiento. Este resultado es coherente con la aparición de desgaste de cráter en esta zona observada en los ensayos realizados en dichas condiciones de mecanizado. Este efecto se debe principalmente a que al aumentar el avance se producen mayores deformaciones en la zona primaria de corte, y por tanto mayor generación de calor, y por las mayores longitudes de contacto viruta-herramienta y fuerzas de mecanizado, que incrementan la generación y transmisión de calor hacia la herramienta en la zona secundaria de corte.
- Para la herramienta con geometría de filo redondeado se observó una mayor altura del punto de estancamiento. La mayor cantidad de material que fluye bajo la herramienta, hace que debido a la recuperación elástica de ese material se produzca fuerza de empuje superior (*ploughing force*) cuanto mayor sea la altura punto de estancamiento. Esto explica los mayores valores de la fuerza de avance obtenidos para la geometría de filo redondeada. El incremento de la velocidad de corte supuso un descenso de la altura del punto de estancamiento, mientras que el aumento del avance supuso un incremento de la altura. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- Se observaron distintas morfologías de viruta para los parámetros de cortes modelizados, principalmente viruta continua y serrada. Para el avance menor (0,05 mm/rev) se observó una viruta continua con un espesor de la viruta constante. Sin embargo, a medida que se aumentaba el avance y la velocidad de corte se observó una mayor tendencia a que apareciese una viruta serrada. Al comparar las dos preparaciones de filo se observó que el aumento del radio aparente supuso un aumento del espesor de viruta y del ángulo de los dientes de la viruta serrada.



## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

En este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas en esta tesis a partir, tanto del trabajo experimental realizado, como del desarrollo y análisis de resultados del modelo numérico sobre mecanizado de Inconel 718 con herramientas PCBN. Posteriormente, se indican las posibles líneas futuras de investigación que podrían desarrollarse a partir de esta tesis.

#### 4.1. Conclusiones

El trabajo experimental desarrollado ha permitido abordar el análisis de la viabilidad de la aplicación de las herramientas PCBN en el mecanizado de acabado de Inconel 718. Se ha desarrollado una metodología que ha permitido determinar con precisión las fuerzas de mecanizado, el desgaste y vida de herramienta y la calidad superficial obtenida en los ensayos realizados. Con esta metodología se han realizado ensayos de mecanizado con 3 condiciones de refrigeración distintas (seco, fluido de corte a presión convencional y a alta presión). Asimismo, se han realizado ensayos de mecanizado de acabado de Inconel 718 con las herramientas de metal duro empleadas actualmente en la industria para realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos con herramientas PCBN.

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del trabajo experimental realizado:

#### 4.1 Conclusiones

- Se ha confirmado la viabilidad de mecanizar Inconel 718 con herramientas de metal duro en seco. Sin embargo, las vidas de herramienta en todos los ensayos realizados con las distintas herramientas PCBN consideradas fueron muy reducidas (entre 0,2 a 1,2 minutos). Estas duraciones hacen imposible su aplicación en procesos industriales. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- En las operaciones de acabado en seco de Inconel 718 con herramientas PCBN se observó una relevante inestabilidad en el corte por lo que fueron predominantes los mecanismos de desgaste relacionados con la fragilidad de la herramienta, principalmente el desgaste de entalla. La reducción de la profundidad de corte mejoró el comportamiento de las herramientas.
- En los ensayos con herramienta PCBN con fluido de corte a presión convencional y a alta presión el desgaste dominante fue de tipo abrasivo (desgaste de flanco). También se observaron otros tipos de desgaste como astillado de filo, entalla y adhesión de material, pero con una progresión más lenta.
- La utilización de refrigeración incrementó notablemente la vida de herramienta de las herramientas PCBN obteniéndose duraciones de en torno a 10 minutos para velocidades de corte de 300 m/min, muy superiores a las empleadas en los procesos convencionales de acabado con herramientas de carburo. Se confirma por tanto la viabilidad de aplicar de emplear herramientas PCBN en procesos de acabado de Inconel 718. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- En los ensayos con herramientas de metal duro con fluido de corte se obtuvieron vidas de herramienta más elevadas que en los ensayos con herramienta PCBN. Sin embargo, en los procesos con herramienta PCBN se emplean velocidades de corte muy superiores por lo que se consiguen mayores superficies mecanizadas por filo y mayores superficies mecanizadas por unidad de tiempo.
- La aplicación de fluido de corte a elevada presión (70 bares) aumenta la duración de la herramienta hasta un 30% en relación con la obtenida con fluido de corte a presión convencional (7,5 bares). Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- De las 4 herramientas PCBN comerciales ensayadas, los mejores resultados se obtuvieron para la herramienta con designación 7015 (Sandvik). Se trata de una herramienta con preparación del filo elíptica que combina una elevada tenacidad con un corte suave con mayor estabilidad y menores fuerzas de mecanizado. Se concluye que la microgeometría de la arista de corte tiene una influencia relevante en el comportamiento de la herramienta en este tipo de procesos. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- Tanto en los procesos de acabado con herramienta PCBN a presión convencional, como a alta presión, en los ensayos con la velocidad de corte mínima (200 m/min) y elevada sección de viruta (avance y/o profundidad de pasada elevada) se observó una mayor inestabilidad en el corte y por ello la aparición de roturas frágiles, especialmente en la zona de la entalla. Estos

fenómenos pueden provocar la rotura prematura de la herramienta por lo que deberían evitarse estas condiciones de corte para la aplicación de herramientas PCBN en operaciones de acabado de Inconel 718.

- En las operaciones de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN empleando fluido de corte se obtuvieron buenos acabados superficiales con valores de rugosidad con menor variabilidad que los obtenidos con herramientas de carburo. La rugosidad superficial es un parámetro relacionado con la integridad superficial del componente y por tanto de gran relevancia en procesos de fabricación de componentes de elevada responsabilidad. El efecto del fluido de corte a alta presión no supuso una mejora en la rugosidad superficial en relación con la refrigeración a presión convencional.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de los procesos de acabado de Inconel 718 con herramientas PCBN se ha desarrollado y validado experimentalmente un modelo numérico 2D basado en elementos finitos considerando las preparaciones de filo de las herramientas que dieron los mejores resultados en los ensayos de desgaste: 7015 (filo elíptico) y CBN170 (filo redondeado). En concreto, el modelo se validó mediante ensayos de corte ortogonal realizados con la herramienta de filo redondeado (CBN170). Se obtuvo una buena correlación entre resultados experimentales y numéricos con un error inferior al 15 % en términos de fuerza de mecanizado. Las principales conclusiones obtenidas del análisis del modelo numérico se muestran a continuación:

- La reducción del avance presentó una reducción considerable de las componentes de fuerza de mecanizado similar a la obtenida experimentalmente. Sin embargo, el efecto de la velocidad de corte en las componentes de las fuerzas no fue tan significativo como el observado experimentalmente. Esto se debe posiblemente al hecho de que el modelo no reproduce el efecto de las pasadas sucesivas, que tiene una influencia notable en la distribución de temperaturas en la pieza y por ende en el comportamiento mecánico de la misma.
- Para la geometría de filo elíptico se obtuvieron valores de las componentes de la fuerza de mecanizado inferiores a las obtenidas con el filo redondeado. La fuerza de corte se redujo entre un 1 % y un 8 %. La reducción fue más significativa para la componente de la fuerza de avance (entre el 18 % y el 25 %). La reducción en las componentes de la fuerza de mecanizado, especialmente la fuerza de avance se correlaciona con los valores de fuerza medidos en los ensayos de desgaste, y se debe a que la herramienta con filo redondeado, al tener un radio aparente mayor, provoca que fluya una cantidad superior de material bajo la herramienta provocando un empuje en la dirección de avance. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- La longitud de contacto proyectada presentó una tendencia similar en los dos afilados de herramienta PCBN para las velocidades de corte y avances estudiados. La herramienta con afilado redondeado presentó valores superiores

#### 4.1 Conclusiones

de longitud de contacto proyectada debido a que la viruta presenta mayores niveles de deformación y temperatura. El aumento del avance supuso un incremento de la longitud de contacto proyectada. En cambio, se observó que el aumento de la velocidad de corte produjo un ligero descenso de la longitud de contacto.

- La temperatura máxima alcanzada en la pieza de trabajo se estabilizó durante los primeros instantes de corte en la zona de la punta de la herramienta cerca de la superficie de incidencia. Se obtuvieron valores elevados de temperatura entre 800 °C y 1000 °C. El incremento de la velocidad de corte supuso un aumento considerable de las temperaturas en la pieza de trabajo, el aumento del avance produjo una tendencia similar, pero con un crecimiento menor. En las simulaciones correspondientes a la herramienta con filo redondeado se observaron temperaturas superiores en la pieza de trabajo, principalmente en la zona debajo del filo de corte. Este efecto también se relaciona con el radio aparente superior que incrementaba el material que fluía bajo la herramienta y por consiguiente los niveles de deformación y temperatura.
- La evolución de la temperatura en la herramienta se analizó durante la longitud de corte simulada final de 8 mm. Se observó, que para avances de 0,05 mm/rev, la temperatura máxima se localizaba en la zona del filo de corte en la que se producían las máximas deformaciones. Sin embargo, para avances superiores, en las 2 geometrías de filo de corte modelizadas la temperatura más elevada se obtenía en la superficie de desprendimiento. Este resultado es coherente con la aparición de desgaste de cráter en esta zona observada en los ensayos realizados en dichas condiciones de mecanizado. Este efecto se debe principalmente a que al aumentar el avance se producen mayores deformaciones en la zona primaria de corte, y por tanto mayor generación de calor, y por las mayores longitudes de contacto viruta-herramienta y fuerzas de mecanizado, que incrementan la generación y transmisión de calor hacia la herramienta en la zona secundaria de corte.
- Para la herramienta con geometría de filo redondeado se observó una mayor altura del punto de estancamiento. La mayor cantidad de material que fluye bajo la herramienta, hace que debido a la recuperación elástica de ese material se produzca fuerza de empuje superior (*ploughing force*) cuanto mayor sea la altura punto de estancamiento. Esto explica los mayores valores de la fuerza de avance obtenidos para la geometría de filo redondeada. El incremento de la velocidad de corte supuso un descenso de la altura del punto de estancamiento, mientras que el aumento del avance supuso un incremento de la altura. Esta conclusión constituye una aportación novedosa relevante de esta tesis doctoral.
- Se observaron distintas morfologías de viruta para los parámetros de cortes modelizados, principalmente viruta continua y serrada. Para el avance menor (0,05 mm/rev) se observó una viruta continua con un espesor de la viruta constante. Sin embargo, a medida que se aumentaba el avance y la velocidad de

corte se observó una mayor tendencia a que apareciese una viruta serrada. Al comparar las dos preparaciones de filo se observó que el aumento del radio aparente supuso un aumento del espesor de viruta y del ángulo de los dientes de la viruta serrada.

## 4.2. Trabajos futuros

La investigación realizada en esta tesis podría completarse desarrollando gran cantidad de líneas de trabajo. A continuación, se indican las líneas experimentales que se consideran de mayor interés:

- Extender el estudio a otras superaleaciones para analizar la viabilidad de la aplicación de las herramientas PCBN en operaciones de acabado de los materiales. En esta línea, en paralelo con el desarrollo de esta tesis doctoral, en el grupo de investigación FABDIS se ha estudiado la viabilidad y optimización de la utilización de herramientas PCBN en procesos de acabado de la superaleación base níquel Haynes 282.
- Estudiar los resultados obtenidos en este tipo de procesos de acabado al emplear otras tecnologías de refrigeración como refrigeración criogénica o aplicación de mínima cantidad de lubricante (MQL).
- Ampliar el estudio del efecto del mecanizado sobre la integridad superficial del componente mediante el análisis de las tensiones residuales y de la microestructura y dureza de la superficie, comparando los resultados obtenidos en procesos de mecanizado con herramienta nueva y desgastada.
- Medición de las temperaturas en la zona de corte en los ensayos de mecanizado para profundizar en el conocimiento del proceso y para realizar una validación de los modelos numéricos más completa.

En cuanto al modelo numérico, las líneas de investigación que se consideran de mayor interés son las siguientes:

- Desarrollar modelos numéricos correspondientes a geometrías de filo desgastadas para analizar la influencia del nivel de desgaste sobre los parámetros termomecánicos en la zona de corte: distribuciones térmicas, longitud de contacto viruta-herramienta, altura de estancamiento, morfología de viruta y componentes de la fuerza de mecanizado.
- Realizar modelos numéricos 3D que permitan modelizar la geometría de los procesos de torneado realmente desarrollados a nivel industrial. Estos modelos suponen costes computacionales muy superiores y en general requieren emplear mallados de menor densidad, pero son especialmente necesarios en procesos de acabado en los que el ancho y el espesor de la viruta son del mismo orden de magnitud. Además, permiten analizar fenómenos de gran interés en los procesos de mecanizado industriales como el desgaste de entalla o las tensiones residuales en la superficie generada con la punta y filo secundario de la herramienta.

## 4.2 Trabajos futuros

- Realizar un modelo con elementos ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) que permita analizar el estacionario de temperaturas en la herramienta y pieza de trabajo.
- Incorporar a los modelos numéricos la presencia de fluido de corte a alta presión para analizar cómo afecta a la morfología de viruta y temperatura, y por consiguiente a los esfuerzos y desgaste de la herramienta de corte.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Edward M. Trent; Paul K. Wright, “Metal Cutting,” Woburn, 2000.
- [2] G. Tecnología and M. Procesos, “GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA – PROCESOS DE FABRICACIÓN RUGOSIDAD SUPERFICIAL Página 2 de 16,” pp. 1–16, [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.
- [3] S. Kalpakjian, S. Schmid, and D. DESIGN, “Manufacturing, Engineering and Technology SI 6th Edition,” p. 1216, 2013, doi: 0133128741.
- [4] R. Polvorosa, A. Suárez, L. N. L. de Lacalle, I. Cerrillo, A. Wretland, and F. Veiga, “Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy,” *J. Manuf. Process.*, vol. 26, pp. 44–56, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2017.01.012.
- [5] H. A. Youssef, *Machining of Stainless Steels and Super Alloys*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [6] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 12–13, pp. 1353–1367, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2005.02.003.
- [7] C. J. Cortés Rodríguez, *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. 2009.

## BIBLIOGRAFÍA

- [8] J. Fulemova and Z. Janda, “Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry,” *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 565–573, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.027.
- [9] J. C. Aurich, C. Effgen, and B. Kirsch, “Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels,” doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.093.
- [10] T. Vopát, Š. Podhorský, M. Sahul, and M. Haršáni, “Cutting edge preparation of cutting tools using plasma discharges in electrolyte,” 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.08.033.
- [11] B. Karpuschewski, K. Schmidt, J. Beň O B,†, I. Maň Ková B, and J. Prilukova, “Measuring procedures of cutting edge preparation when hard turning with coated ceramics tool inserts,” doi: 10.1016/j.measurement.2014.06.008.
- [12] K. D. Bouzakis *et al.*, “Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials,” *Comp. CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 264–273, 2014, doi: 10.1016/j.cirpj.2014.05.003.
- [13] D. Biermann and I. Terwey, “Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes,” *5th CIRP Conf. High Perform. Cut. 2012*, vol. 1, no. 1, pp. 172–177, 2012, doi: 10.1016/j.cirpj.2008.09.002.
- [14] Mikell P. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems,” 2009. .
- [15] Sandvik Coromat, “Desgaste de la plaquita.” <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx>.
- [16] L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez, and A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento : procesos de arranque*. Ediciones Técnicas Izaro, 2004.
- [17] Adrian P. Mouritz, “Introduction to Aerospace Materials,” *Woodhead Publishing*, 2012.  
<https://www.sciencedirect.com/book/9781855739468/introduction-to-aerospace-materials> (accessed Nov. 27, 2019).
- [18] SPECIAL METALS, “INCONEL ® alloy 718.”
- [19] M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Superalloys : a technical guide*. ASM International, 2002.
- [20] I. M. Hutchings and P. Shipway, *Tribology : friction and wear of engineering materials*. .
- [21] D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouquère, V. Zerrouki, and J. Vigneau, “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 4, pp. 439–456, Mar. 2004, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00159-7.



- [22] C. Xue and W. Chen, “Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy,” *Wear*, vol. 270, no. 11–12, pp. 895–902, May 2011, doi: 10.1016/J.WEAR.2011.02.018.
- [23] E. O. Ezugwu and I. R. Pashby, “High speed milling of nickel-based superalloys,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 33, no. 4, pp. 429–437, 1992, doi: 10.1016/0924-0136(92)90277-Y.
- [24] M. A. Xavior, M. Manohar, P. Jeyapandiarajan, and P. M. Madhukar, “Tool Wear Assessment During Machining of Inconel 718,” *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 1000–1008, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.01.252.
- [25] V. Bushlya, J. Zhou, P. Avdovic, and J.-E. Ståhl, “Performance and wear mechanisms of whisker-reinforced alumina, coated and uncoated PCBN tools when high-speed turning aged Inconel 718,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 9–12, pp. 2013–2021, Jun. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4477-5.
- [26] J. Zhou, V. Bushlya, R. L. Peng, Z. Chen, S. Johansson, and J. E. Stahl, “Analysis of Subsurface Microstructure and Residual Stresses in Machined Inconel 718 with PCBN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC<sub>w</sub> Tools,” *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 150–155, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROCIR.2014.04.026.
- [27] H. González, A. Calleja, O. Pereira, N. Ortega, L. López de Lacalle, and M. Barton, “Super Abrasive Machining of Integral Rotary Components Using Grinding Flank Tools,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 1, p. 24, Jan. 2018, doi: 10.3390/met8010024.
- [28] L. N. López De Lacalle, J. Pérez, J. I. Llorente, and J. A. Sánchez, “Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 1–11, Apr. 2000, doi: 10.1016/S0924-0136(99)00372-6.
- [29] L. N. López De Lacalle, G. Urbicain Pelayo, A. Fernández-Valdivielso, A. Alvarez, and H. González, “Wear-dependent specific coefficients in a mechanistic model for turning of nickel-based superalloy with ceramic tools,” *Open Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 175–184, Feb. 2017, doi: 10.1515/eng-2017-0024.
- [30] V. Bushlya, J. Zhou, and J. E. Ståhl, “Effect of cutting conditions on machinability of superalloy inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools,” in *Procedia CIRP*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 370–375, doi: 10.1016/j.procir.2012.07.064.
- [31] J. P. Costes, Y. Guillet, G. Poulachon, and M. Dessoly, “Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 7–8, pp. 1081–1087, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.031.
- [32] J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M. H. Miguélez, and N. C. Marín, “Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718,” *Wear*, vol. 297, no. 1–2, pp. 885–894, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.WEAR.2012.11.004.

## BIBLIOGRAFÍA

- [33] A. Fernández-Valdivielso, L. López de Lacalle, G. Urbikain, and A. Rodriguez, "Detecting the key geometrical features and grades of carbide inserts for the turning of nickel-based alloys concerning surface integrity," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 230, no. 20, pp. 3725–3742, Dec. 2016, doi: 10.1177/0954406215616145.
- [34] B. M. Kramer, "On Tool Materials for High Speed Machining," *J. Eng. Ind.*, vol. 109, no. 2, p. 87, May 1987, doi: 10.1115/1.3187113.
- [35] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang, and A. R. Machado, "The machinability of nickel-based alloys: a review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 1–16, Feb. 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00314-8.
- [36] S. Olovsjö and L. Nyborg, "Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy," *Wear*, vol. 282–283, pp. 12–21, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.WEAR.2012.01.004.
- [37] A. Bhatt, H. Attia, R. Vargas, and V. Thomson, "Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 5–6, pp. 1113–1121, May 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2009.12.053.
- [38] P. . Jindal, A. . Santhanam, U. Schleinkofer, and A. . Shuster, "Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 17, no. 1–3, pp. 163–170, May 1999, doi: 10.1016/S0263-4368(99)00008-6.
- [39] M. Rahman, W. K. H. Seah, and T. T. Teo, "The machinability of Inconel 718," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 63, no. 1–3, pp. 199–204, 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(96)02624-6.
- [40] S. C. Veldhuis, G. K. Dosbaeva, and K. Yamamoto, "Tribological compatibility and improvement of machining productivity and surface integrity," *Tribol. Int.*, vol. 42, no. 6, pp. 1004–1010, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.triboint.2009.02.004.
- [41] K.-D. Bouzakis' ( I ), N. Michailidis', N. Vidakis', K. Eftathiou', S. Kompogiannisl, and G. Erkens2, "Interpretation of PVD Coated Inserts Wear Phenomena in Turning." doi: 10.1016/S0007-8506(07)62897-2.
- [42] J. Yi *et al.*, "Effects of Ni content on microstructure, mechanical properties and Inconel 718 cutting performance of AlTiN-Ni nanocomposite coatings," *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 1, pp. 474–480, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.09.192.
- [43] S. Capasso *et al.*, "A novel method of assessing and predicting coated cutting tool wear during Inconel DA 718 turning," *Wear*, vol. 432–433, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.202949.
- [44] G. Rajkumar, R. Balasundaram, N. Ganesh, and S. Rajaram, "Investigation of Turning Parameters of Machining INCONEL 718 using Titanium and Carbide Inserts," in *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 11283–11294, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.095.
- [45] K. Sobiya and I. Sigalas, "HighhSpeed Machining of Martensitic Stainless Steel Using PcBN 1," *J. Superhard Mater.*, vol. 38, no. 1, pp. 34–39, 2016, doi: 10.3103/S1063457616010056.

- [46] V. Dahyabhai Patel and A. Hasmukhlal Gandhi, "Analytical and Empirical Modeling of Wear and Forces of CBN Tool in Hard Turning - A Review," *J. Inst. Eng. India Ser. C*, vol. 98, no. 4, pp. 507–513, 2017, doi: 10.1007/s40032-016-0310-5.
- [47] L. Chen, J.-E. Stahl, W. Zhao, and J. Zhou, "Assessment on abrasiveness of high chromium cast iron material on the wear performance of PCBN cutting tools in dry machining," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 255, pp. 110–120, May 2018, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2017.11.054.
- [48] C. Lahiff, S. Gordon, and P. Phelan, "PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 23, no. 6, pp. 638–644, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.RCIM.2007.02.008.
- [49] O. Gutnichenko, V. Bushlya, J. M. Zhou, and J.-E. Stahl, "Tool Wear and Vibrations Generated When Turning High-chromium White Cast Iron with pCBN Tools," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 285–289, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.04.005.
- [50] O. Gutnichenko, V. Bushlya, J. Zhou, and J.-E. Ståhl, "Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with pcBN tools," *Wear*, vol. 390–391, pp. 253–269, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.WEAR.2017.08.005.
- [51] D. Boing, R. B. Schroeter, and A. J. de Oliveira, "Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with PCBN tools," *Wear*, vol. 398–399, pp. 69–78, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.WEAR.2017.11.017.
- [52] G. Poulachon, A. Moisan, and I. S. Jawahir, "Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools," *Wear*, vol. 250, no. 1–12, pp. 576–586, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0043-1648(01)00609-3.
- [53] R. M'Saoubi, M. P. Johansson, and J. M. Andersson, "Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools," *Wear*, vol. 302, no. 1–2, pp. 1219–1229, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.WEAR.2013.01.074.
- [54] N. Ånmark *et al.*, "The effect of inclusion composition on tool wear in hard part turning using PCBN cutting tools," *Wear*, vol. 334–335, pp. 13–22, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.WEAR.2015.04.008.
- [55] W. Y. . Liew, B. K. . Ngoi, and Y. . Lu, "Wear characteristics of PCBN tools in the ultra-precision machining of stainless steel at low speeds," *Wear*, vol. 254, no. 3–4, pp. 265–277, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00002-4.
- [56] H. Tanaka, T. Sugihara, and T. Enomoto, "High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Wear Behaviors of PCBN Cutting Tool," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 545–548, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.03.120.
- [57] V. Bushlya *et al.*, "On chemical and diffusional interactions between PCBN and superalloy Inconel 718: Imitational experiments," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 8, pp. 2658–2665, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.002.
- [58] M. S. Kumar, S. R. Reddy, and V. Vasu, "A 3-D Simulation and Experimental Study of Cutting Forces in Turning Inconel-718," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 9, pp. 9942–9945, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.298.

## BIBLIOGRAFÍA

- [59] B. Denkena, T. Grove, A. Krödel, and L. Ellersiek, “Increased performance in high speed turning of Inconel 718 by laser structuring of PcBN tools,” in *Procedia CIRP*, Jan. 2018, vol. 77, pp. 602–605, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.202.
- [60] A. Thakur and S. Gangopadhyay, “State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 100, pp. 25–54, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2015.10.001.
- [61] E. O. Ezugwu and J. Bonney, “Finish Machining of Nickel-Base Inconel 718 Alloy with Coated Carbide Tool under Conventional and High-Pressure Coolant Supplies,” *Tribol. Trans.*, vol. 48, no. 1, pp. 76–81, Jan. 2005, doi: 10.1080/05698190590899958.
- [62] E. O. Ezugwu and J. Bonney, “Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, pp. 1045–1050, Nov. 2004, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2004.04.329.
- [63] K. Sørby and Z. Vagnorius, “High-pressure cooling in turning of inconel 625 with ceramic cutting tools,” in *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 74–77, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.221.
- [64] Z. Vagnorius and K. Sørby, “Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 1–4, pp. 83–92, Apr. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2944-4.
- [65] Z. Fang and T. Obikawa, “Turning of Inconel 718 using inserts with cooling channels under high pressure jet coolant assistance,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 247, pp. 19–28, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.032.
- [66] D. Cica and D. Kramar, “Multi-objective optimization of high-pressure jet-assisted turning of Inconel 718,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04513-4.
- [67] F. Klocke and G. Eisenblätter, “Dry Cutting,” *CIRP Ann.*, vol. 46, no. 2, pp. 519–526, Jan. 1997, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60877-4.
- [68] A. Shokrani, V. Dhokia, and S. T. Newman, “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 57, pp. 83–101, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2012.02.002.
- [69] A. Ginting and M. Nouari, “Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 7–8, pp. 758–768, Jun. 2006, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2005.07.035.
- [70] F. Nabhani, “Machining of aerospace titanium alloys,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 17, no. 1–2, pp. 99–106, Feb. 2001, doi: 10.1016/S0736-5845(00)00042-9.

- [71] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, and D. Larrouquere, "Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools," *Wear*, vol. 262, no. 7–8, pp. 931–942, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.WEAR.2006.10.009.
- [72] H. R. Krain, A. R. C. Sharman, and K. Ridgway, "Optimisation of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1–3, pp. 153–161, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.01.017.
- [73] A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, and D. Dudzinski, "Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 10, pp. 1590–1598, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2011.04.011.
- [74] KISTLER, "Multicomponent Dynamometer- Type 9257B, 5 ... 10 kN, top plate 100x170 mm," wINTERTHUR, 2009. Accessed: Oct. 14, 2020. [Online]. Available: [www.kistler.com](http://www.kistler.com).
- [75] J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M. H. Miguélez, and N. C. Marín, "Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718," *Wear*, vol. 297, no. 1–2, pp. 885–894, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.wear.2012.11.004.
- [76] J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M. H. Miguélez, and N. C. Marín, "Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718," *Wear*, vol. 297, no. 1–2, pp. 885–894, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.WEAR.2012.11.004.
- [77] J. De La Cruz, *CAPITULO 3.El Método de Elementos Finitos en la Simulación de Procesos de Mecanizado*. .
- [78] A. P. Markopoulos, *Finite Element Method in Machining Processes*. London: Springer London, 2013.
- [79] O. C. Zienkiewicz, "The birth of the finite element method and of computational mechanics," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 60, no. 1, pp. 3–10, May 2004, doi: 10.1002/nme.951.
- [80] A. P. Markopoulos, "Finite Element Method in Machining Processes," *Thermoplast. Thermoplast. Compos.*, no. December 2013, pp. 863–866, 2007, doi: 10.1007/978-1-4471-4330-7.
- [81] F. Klocke, D. Lung, and H. Puls, "FEM-Modelling of the thermal workpiece deformation in dry turning," *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 240–245, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.096.
- [82] X. Soldani, H. López-Gálvez, and J. Díaz-Álvarez, "Numerical modeling of instabilities during machining of aeronautical alloy," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 36–42, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.006.
- [83] S. Pervaiz, I. Deiab, E. Wahba, A. Rashid, and M. Nicolescu, "A numerical and experimental study to investigate convective heat transfer and associated cutting temperature distribution in single point turning," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 897–910, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0975-9.

- [84] M. Lotfi, S. Amini, and M. Aghaei, "3D FEM simulation of tool wear in ultrasonic assisted rotary turning," *Ultrasonics*, vol. 88, pp. 106–114, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ultras.2018.03.013.
- [85] H. Persson, M. Agmell, V. Bushlya, and J. E. Ståhl, "Experimental and Numerical Investigation of Burr Formation in Intermittent Turning of AISI 4140," *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 37–42, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.165.
- [86] J. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, H. Miguélez, and X. Soldani, "Numerical analysis of thermomechanical phenomena influencing tool wear in finishing turning of Inconel 718," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 82, pp. 161–169, 2014, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.010.
- [87] E. Segebade, M. Gerstenmeyer, F. Zanger, and V. Schulze, "Cutting Simulations Using a Commercially Available 2D/3D FEM Software for Forming," in *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 73–78, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.195.
- [88] M. Asad, T. Mabrouki, H. Ijaz, M. Aurangzeb Khan, and W. Saleem, "On the turning modeling and simulation: 2D and 3D FEM approaches," *Mech. Ind.*, vol. 15, no. 5, pp. 427–434, 2014, doi: 10.1051/meca/2014045.
- [89] G. Mathieu, V. Frédéric, R. Vincent, and F. Eric, "3D stationary simulation of a turning operation with an Eulerian approach," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 76, pp. 134–146, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.006.
- [90] S. K. Mishra, S. Ghosh, and S. Aravindan, "FEM based evaluation of Ti6Al4V cutting with plain and textured WC/Co tools under cryogenic cooling environment," *Procedia Manuf.*, vol. 40, pp. 8–13, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.003.
- [91] K. Prakash Marimuthu, C. S. C. Kumar, and H. P. T. Prasada, "2D Finite Element Thermo-Mechanical Model to Predict Machining Induced Residual Stresses Using ALE Approach," in *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 11780–11786, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.147.
- [92] C. Hanson, P. Hiwase, X. Chen, M. P. Jahan, J. Ma, and G. Arbuckle, "Experimental investigation and numerical simulation of burr formation in micro-milling of polycarbonates," in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 34, pp. 293–304, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.153.
- [93] N. Duboust *et al.*, "FE modelling of CFRP machining- prediction of the effects of cutting edge rounding," in *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 59–64, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.037.
- [94] N. Geier, J. P. Davim, and T. Szalay, "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 125, Elsevier Ltd, Oct. 01, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [95] K. Gok, "Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 75, pp. 57–68, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.034.

- [96] R. Muhammad, A. Roy, and V. V. Silberschmidt, "Finite element modelling of conventional and hybrid oblique turning processes of titanium alloy," *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 510–515, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.142.
- [97] S. Schindler, M. Zimmermann, J. C. Aurich, and P. Steinmann, "Finite element model to calculate the thermal expansions of the tool and the workpiece in dry turning," *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 535–540, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.087.
- [98] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, and V. Kumawat, "Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 54, pp. 165–177, 2016, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.027.
- [99] F. H. Cakir, S. Gorgen, M. A. Sofuoglu, O. N. Celik, and M. C. Kushan, "Finite Element Modeling of Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, no. 222, pp. 2839–2848, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.404.
- [100] V. Vijayaraghavan, A. Garg, L. Gao, R. Vijayaraghavan, and G. Lu, "A finite element based data analytics approach for modeling turning process of Inconel 718 alloys," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1619–1627, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.010.
- [101] B. Satyanatayana, P. Ruthvik Nitin, M. Dileep, and Reddy, "Optimization of controllable turning parameters for high speed dry machining of a super alloy," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 4878–4886, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.064.
- [102] E. Usui, K. Maekawa, and T. Shirakashi, "SIMULATION ANALYSIS OF BUILT-UP EDGE FORMATION IN MACHINING OF LOW CARBON STEEL.," *Bull. Japan Soc. Precis. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 237–242, 1981, doi: 10.2493/jjspe1933.47.197.
- [103] P. L. B. (Peter L. B. Oxley, *The mechanics of machining : an analytical approach to assessing machinability*. E. Horwood, 1989.
- [104] G. R. Johnson and W. H. Cook, "A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAIN RATES AND HIGH TEMPERATURES."
- [105] F. J. Zerilli and R. W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations," *J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 5, pp. 1816–1825, Mar. 1987, doi: 10.1063/1.338024.
- [106] F. Klocke, D. Lung, and S. Buchkremer, "Inverse identification of the constitutive equation of inconel 718 and AISI 1045 from FE machining simulations," in *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 212–217, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.091.

## BIBLIOGRAFÍA

- [107] F. Jafarian, M. Imaz Ciaran, D. Umbrello, P. J. Arrazola, L. Filice, and H. Amirabadi, “Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 88, pp. 110–121, 2014, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.007.
- [108] A. Iturbe *et al.*, “Mechanical characterization and modelling of Inconel 718 material behavior for machining process assessment,” doi: 10.1016/j.msea.2016.11.054i.
- [109] T. Ozel, I. Llanos, J. Soriano, and P. J. Arrazola, “3d finite element modelling of chip formation process for machining inconel 718: Comparison of FE software predictions,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 21–46, Jan. 2011, doi: 10.1080/10910344.2011.557950.
- [110] D. Biermann, R. Amuth, S. Hess, and M. Tiffe, “Simulation based analysis and optimisation of the cutting edge micro shape for machining of nickel-base alloys,” in *Procedia CIRP*, Jan. 2018, vol. 67, pp. 284–289, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.214.
- [111] T. Özel, “Modeling of hard part machining: Effect of insert edge preparation in CBN cutting tools,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 141, no. 2, pp. 284–293, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00278-4.
- [112] A. Del Prete, L. Filice, and D. Umbrello, “Numerical simulation of machining nickel-based alloys,” *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 540–545, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.147.
- [113] J. Wang, D. Zhang, B. Wu, and M. Luo, “Numerical and Empirical Modelling of Machining-induced Residual Stresses in Ball end Milling of Inconel 718,” *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 7–12, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.177.
- [114] S. Rajashekhar Reddy, M. S. Kumar, and V. Vasu, “Temperature study in Turning Inconel-718: 3D Simulation and Experimentation,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2017, vol. 4, no. 9, pp. 9946–9950, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.299.
- [115] A. Madariaga, A. Kortabarria, E. Hormaetxe, A. Garay, and P. J. Arrazola, “Influence of Tool Wear on Residual Stresses When Turning Inconel 718,” *Procedia CIRP*, vol. 45, pp. 267–270, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.359.
- [116] L. Chen, B. L. Tai, R. G. Chaudhari, X. Song, and A. J. Shih, “Machined surface temperature in hard turning,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 121, pp. 10–21, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.03.003.
- [117] V. Kryzhanivskyy, V. Bushlya, O. Gutnichenko, I. A. Petruscha, and J. E. Ståhl, “Modelling and experimental investigation of cutting temperature when rough turning hardened tool steel with PCBN tools,” *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 489–495, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.03.079.



- [118] K. Venkatesan, J. Kanubhai, G. V. Raval, and S. H. Vipulkumar, “A Study on Prediction of Forces and Cutting Temperature in Laser-Assisted Machining of Inconel 718 Alloy Using Numerical Approach,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2018, vol. 5, no. 5, pp. 12339–12348, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.212.
- [119] J. C. Garcia-Gonzalez, W. Moscoso-Kingsley, and V. Madhavan, “Tool Rake Face Temperature Distribution When Machining Ti6Al4V and Inconel 718,” *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 1369–1381, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.107.
- [120] H. López-Gálvez and X. Soldani, “Determination of optimum numerical parameters in a 3D model of finish turning operation applied to Inconel 718,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 99, p. 102035, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.simpat.2019.102035.
- [121] S. Rinaldi, D. Umbrello, G. Rotella, and A. Del Prete, “A physically based model to predict microstructural modifications in Inconel 718 high speed machining,” in *Procedia Manufacturing*, Jan. 2020, vol. 47, pp. 487–492, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.344.
- [122] B. Shi, H. Attia, and N. Tounsi, “Identification of material constitutive laws for machining - Part I: An analytical model describing the stress, strain, strain rate, and temperature fields in the primary shear zone in orthogonal metal cutting,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 132, no. 5, Oct. 2010, doi: 10.1115/1.4002454.
- [123] A. Del Prete, L. Filice, and D. Umbrello, “Numerical Simulation of Machining Nickel-Based Alloys Selection and/or peer-review under responsibility of The International Scientific Committee of the 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations" in the person of the Conference Chair Prof. Luca Settineri,” *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 540–545, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.147.
- [124] A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, “Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning,” in *Computational Materials Science*, Mar. 2005, vol. 32, no. 3–4, pp. 463–471, doi: 10.1016/j.commatsci.2004.09.019.
- [125] B. Zhang, D. J. Mynors, A. Mugarra, and K. Ostolaza, “Representing the superplasticity of Inconel 718,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, no. 1–3, pp. 694–698, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.138.
- [126] J. J. DeMange, V. Prakash, and J. M. Pereira, “Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 8, pp. 1027–1043, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2009.01.007.
- [127] K. Weinert and T. Bruchhaus, “Tribological investigations into the operational behavior of self-piloting drilling tools,” *Wear*, vol. 225–229, no. PART II, pp. 925–935, 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(98)00411-6.
- [128] D. P. Sekulić, “Advances in brazing: Science, technology and applications,” *Advances in Brazing: Science, Technology and Applications*, 2013. .

## BIBLIOGRAFÍA

- [129] J. Díaz Álvarez, “Análisis numérico y experimental del desgaste de herramienta e integridad superficial en los procesos de torneado de Inconel 718,” Universidad Carlos III, Madrid, 2013.
- [130] A. K. Parida and K. Maity, “Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 3, pp. 364–370, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jestech.2018.03.018.
- [131] Y. Karpát and T. Özel, “Mechanics of high speed cutting with curvilinear edge tools,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 2, pp. 195–208, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.015.
- [132] Q. Shen, Z. Liu, Y. Hua, J. Zhao, W. Lv, and A. U. H. Mohsan, “Effects of cutting edge microgeometry on residual stress in orthogonal cutting of inconel 718 by FEM,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/ma11061015.
- [133] M. Agmell, D. Johansson, S. V. A. Laakso, A. Ahadi, and J. E. Ståhl, “The Influence the Uncut Chip Thickness has on the Stagnation Point in Orthogonal Cutting,” in *Procedia CIRP*, Jan. 2017, vol. 58, pp. 13–18, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.183.
- [134] X. Zhang, S. Wu, H. Wang, and C. R. Liu, “Predicting the Effects of Cutting Parameters and Tool Geometry on Hard Turning Process Using Finite Element Method,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 133, no. 4, Aug. 2011, doi: 10.1115/1.4004611.
- [135] S. Atlati, A. Moufki, M. Nouari, and B. Haddag, “Interaction between the local tribological conditions at the tool–chip interface and the thermomechanical process in the primary shear zone when dry machining the aluminum alloy AA2024–T351,” *Tribol. Int.*, vol. 105, pp. 326–333, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.006.
- [136] Y. Karpát and T. Özel, “Analytical and thermal modeling of high-speed machining with chamfered tools,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 1, pp. 0110011–01100115, Feb. 2008, doi: 10.1115/1.2783282.
- [137] N. Fang, “Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool,” *Wear*, vol. 258, no. 5–6, pp. 890–897, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.wear.2004.09.047.
- [138] J. Zang, J. Zhao, A. Li, and J. Pang, “Serrated chip formation mechanism analysis for machining of titanium alloy Ti-6Al-4V based on thermal property,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 98, no. 1–4, pp. 119–127, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0451-6.
- [139] M. Rakesh and S. Datta, “Machining of Inconel 718 Using Coated WC Tool: Effects of Cutting Speed on Chip Morphology and Mechanisms of Tool Wear,” *Arab. J. Sci. Eng.*, doi: 10.1007/s13369-019-04171-4.
- [140] R. S. Pawade and S. S. Joshi, “Mechanism of chip formation in high-speed turning of inconel 718,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 132–152, 2011, doi: 10.1080/10910344.2011.557974.

- [141] M. Du, Z. Cheng, and S. Wang, “Finite element modeling of friction at the tool-chip-workpiece interface in high speed machining of Ti6Al4V,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 163, p. 105100, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105100.
- [142] C. Sateesh Kumar and S. Kumar Patel, “Hard machining performance of PVD AlCrN coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN ceramic inserts as a function of thin film thickness,” *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 16, pp. 13314–13329, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.030.